

El reto de la transferencia de los resultados de la investigación a la industria

E. Oñate

El reto de la transferencia de los resultados de la investigación a la industria

E. Oñate

Publicación CIMNE Nº-386, Octubre 2012

EL RETO DE LA TRANSFERENCIA DE LOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN A LA INDUSTRIA

Eugenio Oñate
Catedrático de Estructuras
ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos,
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
Director del Centro Internacional de
Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE, www.cimne.com)

RESUMEN

En este trabajo se analizan algunas de las razones que dificultan y favorecen la transferencia de los resultados de la investigación que se desarrolla en entornos científicos al sector industrial.

En concreto se analiza el proceso de la innovación y sus factores de impulso e inhibición. También se describe el ciclo que siguen las ideas, desde que se originan en un entorno científico hasta que se transforman en productos de éxito comercial. Finalmente, se presentan algunas recomendaciones para favorecer el proceso de transferencia de los resultados de la investigación a la industria y se propone la creación de un nuevo modelo de centro de I+D+I.

INTRODUCCIÓN

Para facilitar la comprensión de los distintos conceptos definiremos la *innovación* como “una idea, procedimiento u objeto que se percibe como nuevo por un individuo o una organización, por ejemplo una empresa” (Rogers, 1995) . Por otra parte, para la *tecnología* adoptamos el concepto de la Enciclopedia Británica:” Tecnología es la aplicación del conocimiento científico a los fines prácticos de la vida humana, o dicho de otra manera, al cambio y transformación del entorno humano” (Britannica, 2001).

Innovación tecnológica, por tanto, sería la particularización de la tecnología a los casos en que esta tenga un carácter novedoso. En ese sentido, *innovación tecnológica* y *nuevas tecnologías* son términos equivalentes y así los usaremos en este texto.

Más interesante es, sin embargo, considerar los procesos a través de los cuales se crean nuevas tecnologías y su relación con la ciencia. Está demostrado que la ciencia comenzó con el uso de la aritmética por las primeras grandes civilizaciones sumerias unos 3000 años antes de Cristo (AC), mientras que la tecnología es tan antigua como el hombre. Un ejemplo de esto último son los avances en la tecnología de la construcción de los que

hay referencias en Egipto desde 6000 años AC. Por consiguiente, desde los albores de la humanidad hasta unos 3000 años AC los procesos de innovación tecnológica eran independientes de la ciencia y su método. Esto fue así porque los descubrimientos dependían exclusivamente del método de prueba y error para *saber cómo* funcionaban las nuevas ideas, independientemente de *saber por qué* funcionaban.

Por tanto, si consideramos que la tecnología es el conjunto de técnicas que se utilizan para desarrollar productos y servicios y, más concretamente las técnicas desarrolladas empleando el conocimiento científico y utilizando el método científico, podemos decir que “el proceso de innovación tecnológica es la secuencia de actividades que se llevan a cabo para generar nuevas técnicas con la ayuda de las ciencias y sus métodos” (Cantisani, 2006).

No hay que olvidar, sin embargo, que, aunque coexistentes desde 3000 años AC hasta nuestros días, la ciencia y la tecnología han seguido caminos independientes la mayor parte del tiempo. Muchos científicos, sin embargo, han abogado por el cruce de esos caminos, desde el ejemplo pionero del gran Roger Bacon que por su importancia merece ser recordado con más detalle.

ROGER BACON. EL PRIMER CIENTÍFICO Y TECNÓLOGO

Algunas pistas de lo que se avecinaba en la Europa medieval con la irrupción de las nuevas corrientes de pensamiento provenientes del sur, se desprenden claramente del trabajo y la vida de Roger Bacon (1214-1294). Contemporáneo de Dante Alighieri (1265-1321) durante casi treinta años, Bacon y Dante fueron una de las parejas más discordantes que puede encontrarse en un mismo siglo a lo largo de la historia. Dante fue la encarnación de la Edad Media y su filosofía natural permaneció viva durante unos doscientos años antes de que fuera enterrada para siempre. Bacon fue la encarnación del estilo de la nueva era de la ciencia moderna y su vocación de enlace con la tecnología, aunque su mensaje permaneció semi-latente durante casi trescientos años antes de que tuviera vida plena. Dante adquirió rápidamente una reputación universal; Bacon tuvo que contentarse con el honor vacío de haber sido un hombre que «podría haber sido grande» si hubiera nacido tres siglos más tarde. Sin embargo, sólo unos pocos especialistas en literatura conocen hoy algo de la sustitución mística de la ciencia de Dante y, ciertamente, prácticamente ninguno defiende esas ideas. Sin embargo, millones de hombres viven gracias a que la ciencia

matemático-experimental que Bacon intentó aplicar al mundo demasiado pronto, fue finalmente enseñada y aceptada.

En contraste con el éxito literario de Dante, la vida frustrada de Roger Bacon es un claro exponente del conflicto del siglo XIII entre el mundo medieval, prácticamente muerto, y el moderno todavía sin acabar de nacer. Así, para unos, la mayoría de los trabajos de Bacon fueron la gota de agua en el desierto medieval y el preludio de los grandes avances del Renacimiento doscientos años después. Los contrarios, presentan a Bacon como un compilador y enciclopedista excesivo, sin capacidad para expresar nuevas ideas en matemática y ciencia.

Ciertamente, parece haber un exceso de celo en las dos partes de la disputa. Los defensores de la Edad Media insisten en que la ciencia medieval, especialmente en su aspecto experimental, ha sido mal interpretada. Los partidarios de la ciencia moderna argumentan que cualesquiera que fueron las virtudes de la Edad Media en ciencia y en otros aspectos, el mundo tuvo ya bastante del pensamiento medieval en el pasado y no quiere más de él ahora o en el futuro. En el centro de esta controversia se encuentra Roger Bacon, indiferente por igual a los prejuicios de admiradores y detractores. Lo cierto es que, aunque no fue Galileo ni Newton, seguramente ambos grandes científicos le habrían bienvenido en su compañía.

Siendo un hombre de su tiempo, Bacon pagó a la numerología medieval el tributo de su sincero respeto: «Las matemáticas», dice Bacon, «son la puerta y la llave de las ciencias y fueron descubiertas por los santos al principio del mundo... y han sido siempre utilizadas por todos los santos y sabios mucho más que todas las ciencias. El rechazo de las matemáticas daña a todo el conocimiento, puesto que el que las desconoce no puede conocer otras ciencias o las cosas de este mundo y lo que es peor, los hombres que son así, ignorantes, son incapaces de percibir su propia ignorancia y no buscan el remedio».

Excepto por la inclusión de los santos -San Agustín y sus sucesores- las palabras de Bacon podrían ser compartidas por cualquier discípulo de Newton. No obstante, su significado para Bacon no era el mismo que para nosotros, lo que es evidente de sus comentarios sobre los números místicos de la astrología. Porque, aunque las matemáticas podían ser la puerta y la llave de las ciencias, la astrología era la ciencia reina por añadidura en la época. Así, la fracción medieval de la mente de Bacon se inclinó ante la astronomía, mientras que la otra mitad era libre.

Tras unos años en la universidad de París, donde estudió ciencias e idiomas, incluido el árabe, Bacon regresó a Oxford donde había sido estudiante. Allí pugnó, con relativa fortuna, a reemplazar la lógica por las matemáticas en los estudios universitarios. «Las divinas matemáticas», declaró, plagiando quizás inconscientemente a Platón, «pueden purgar el intelecto y preparar al estudiante para adquirir cualquier conocimiento». La frase de Bacon iba fundamentalmente dirigida a los aristotélicos, entre cuyo marasmo trató de practicar la ciencia. Desafiando a la caterva de lógicos medievales que le rodeaban, predicó claramente la doctrina herética de que la experimentación es el único cimiento fiable para las ciencias naturales. Más concretamente, propugnó el método científico moderno de proceder desde la formulación matemática de principios descubiertos empíricamente, hasta llegar a deducir reglas y fórmulas generales y comparar los resultados con la observación, o con nuevos experimentos.

La ciencia prematura de Bacon nació de su conocimiento de lo que los musulmanes habían hecho, mientras que los europeos medievales se perdían en un mar de dialéctica hasta que los hechos los despertaron abruptamente. Mientras que los cristianos, seguidores de «todos los santos y sabios» discutían sobre los misterios sagrados de los números, los seguidores del infiel profeta Mahoma cultivaban la ciencia empírica y las matemáticas. Bacon no pudo decidirse si seguir a los santos o al profeta. Así, dividió su mente y siguió a ambos.

Después de gastar una fortuna en libros, aparatos y manuscritos árabes, Bacon, entrado en los cuarenta años, se encontró arruinado y sin amigos, decidiendo entonces hacerse franciscano. Desde el retiro conventual cultivó su ciencia “aplicada”. La química, la óptica y la busca de la piedra filosofal a través de la alquimia le ayudaron a liberarse del tedio.

Naturalmente, sus hermanos franciscanos le acusaron de comerciar con el demonio. Sus ruidosos y malolientes experimentos con pólvora fueron sin duda parte del motivo de la acusación.

Con objeto de vigilarle mejor, Bacon fue enviado a París. Allí, Guy de Foulkes, a quien Bacon conocía de Inglaterra, le animó a proseguir sus investigaciones. Poco después, cuando de Foulkes llegó a Papa (Clemente IV), Bacon consiguió algunos fondos para comprar material de escritura y pedir libros prestados. En quince meses acabó su Opus Maius. Recibida la obra por el Papa, pese a que estaba seriamente enfermo (era el año 1267 y falleció en 1268), pudo dar las ordenes oportunas para organizar el regreso de Bacon a

Londres. Allí, sin apenas amigos pasó sus últimos años, rodeado de controversia, pasando incluso algunos períodos en prisión, hasta su muerte a la edad de ochenta años.

Aunque su química era prácticamente alquimia y sus «matemáticas divinas» no estaban limpias de numerología, Bacon puede en gran parte considerarse el primer científico-tecnólogo moderno. Sus trabajos en óptica sobre las leyes de reflexión y, en menor medida, sobre la refracción, sus intentos de explicar el arco iris, y los experimentos con lentes de aumento, por citar algunos, le elevaron a un mundo lejos del universo de palabras en el que la mayoría de europeos contemporáneos se encontraban. Y esto es cierto, hubiera o no Bacon adquirido sus conocimientos de óptica de los árabes. Otros tuvieron la misma oportunidad y no la aprovecharon (Oñate, 1998).

FACTORES DE INHIBICIÓN EN LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA

Uno podría preguntarse por qué los tecnólogos han tardado tantos siglos en usar la ciencia en sus tareas innovadoras. Es decir, por qué se tardó tanto en usar el conocimiento relativo al “*saber por qué*” para mejorar los procesos de prueba y error típicos en los descubrimientos del “*saber cómo*.”

Para encontrar la respuesta hay que recordar, en primer lugar, que la actividad clave en procesos de innovación es la *concepción de nuevas ideas*. El principal problema aquí es que esa concepción empieza siempre en la mente de un individuo y esa mente está sometida a la acción de diversos factores que pueden incentivar o bloquear la acción creadora.

Una buena parte de la respuesta a la pregunta planteada se obtiene, por tanto , analizando los denominados factores de *inhibición de las innovaciones*, consideradas en plural ya que esos factores típicamente inhiben todo tipo de innovaciones: los procesos de innovación tecnológica contemporáneos, los procesos de innovación organizacionales, las innovaciones éticas, etc. De acuerdo con Cantisani (2006) dichos factores de inhibición se clasifican en *de gestión, económicos, psicosociales, culturales e individuales*. Los cuatro primeros son factores colectivos, mientras que el último afecta en mayor o menor grado a la capacidad de innovación (o de influir en ella) de cada individuo, considerado de forma aislada.

Arquímedes es probablemente el ejemplo documentado más antiguo de una inhibición cultural ya en el siglo 3 AC. Su descubrimiento del empuje hidrostático de los cuerpos sumergidos, que le hizo exclamar la famosa expresión ¡Eureka!, no quedó suficientemente bien documentado (Oñate, 1998). Eso fue debido a que, pese a ser considerado por sus inventos el “más reputado exponente de la sagacidad humana” (Plutarco, Britannica, 1971, Vol 11, pp 399-400), Arquímedes entendió que escribir sobre temas prácticos diferentes de la Geometría (la actividad científica más noble de la época) era “sórdido e innoble” y más propio de labores artesanas que debían ser llevadas a cabo por esclavos y sirvientes.

Es indiscutible que desde el punto de vista intelectual, el estudio sistemático de técnicas para hacer y ejecutar cosas con un objetivo práctico, es menos noble y altruista que el intento sistemático de entender e interpretar el mundo (por el mero hecho de entenderlo para el correspondiente beneficio de la humanidad). En resumen, históricamente la ciencia ha tenido menos glamour y valoración social que la tecnología.

Los factores de inhibición *de gestión* y *económicos* son más fáciles de contrarrestar. Por otra parte, el factor *psicosocial* es más difícil de alterar, ya que si un gran número de personas adopta una determinada posición durante un largo tiempo con respecto al bloqueo de una idea o avance concreto, esa actitud tiende a transformar el factor de inhibición *psicosocial* en otro de tipo *cultural*. Los factores de inhibición *culturales*, al ser fundamentalmente paradigmas, son muy difíciles de contrarrestar, ya que para cambiarlos hay que modificar los cambios en el comportamiento psicosocial de mucha gente durante mucho tiempo.

Para entender la acción de los factores de inhibición de las innovaciones, más importante que las clases en que se dividen –de gestión, económicos, psicosociales, culturales e individuales– lo son las interrelaciones entre ellos. Por ejemplo, en la Figura 1 se muestra que todos los factores combinan sus acciones principales hacia el factor *individual*, como si “conspiraran” entre ellos para mantener el *status quo*, evitando por todos los medios cualquier cambio o innovación. Es ilustrador que a este respecto Shaw (2002) escribió: “El hombre razonable se adapta al mundo; el no razonable persiste en adaptar el mundo a él. Por tanto, todo progreso depende del hombre no razonable”.

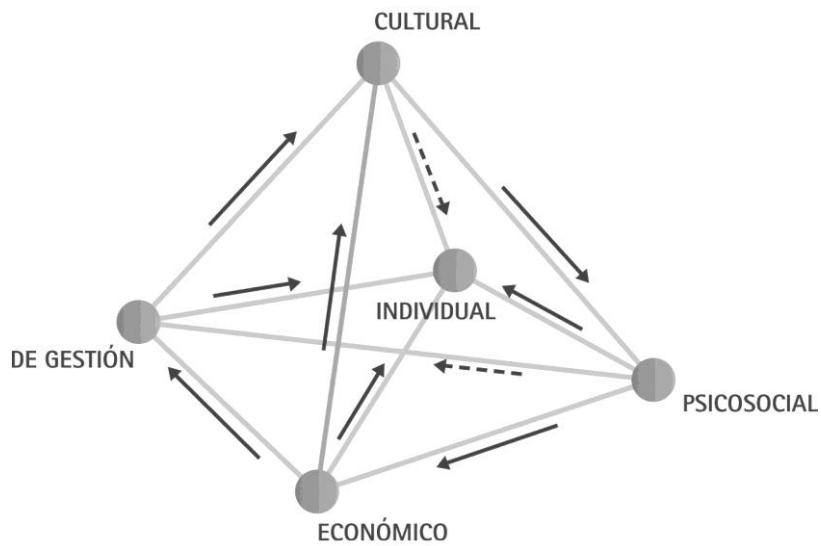


Figura 1. Factores inhibidores de la innovación y principales interacciones. Para cada interacción hay otra secundaria desinhibidora en sentido contrario que no se muestra en la figura.

Obviamente cada factor de inhibición de la innovación tiene su *contra-factor* que trata de neutralizar la acción inhibidora y contrarrestarlo mediante políticas y acciones positivas concretas. Por ejemplo, en innovación ética, cuando Sócrates concluyó que tenía que combatir el supuesto conocimiento prefijado de sus conciudadanos, después de trabajar este concepto (movimiento de factor *individual* a *psicosocial* en Figura 1) a través de interacciones psicosociales. Acompañado de Platón y otros intentaron convencer a ciudadanos sabios de Atenas a través de más interacciones psicosociales (en calles, plazas, etc.) de que realmente no tenían el conocimiento que creían tener, y que ello les impedía aprender cosas que estaban más cerca de la verdad. Aunque el movimiento innovador de Sócrates fue la causa de su muerte, sus ideas fueron eventualmente aceptadas, transformándose (movimiento de factor *psicosocial* a *cultural*) en un valor ético cultural universal de tanta importancia que quedaron asignadas a su nombre (movimiento de factor *cultural* a *individual*).

Otro ejemplo del que hay referencias en numerosos países, sobre todo en países en vías de desarrollo, son los factores de inhibición de la innovación de tipo *económico* debido a políticas de proteccionismo de las industrias incipientes. Esto origina a su vez factores de inhibición de tipo *psicosocial* que, unidos a los *culturales*, son la explicación del lento progreso de algunos países.

El Cuadro 1 lista y compara algunos estándares de comportamiento cultural basados en ventajas comparativas (se oponen al progreso) y competitivas (favorecen el progreso) obtenidos de estudios de modelos proteccionistas en países durante varias décadas (Lindsay, 2000).

VENTAJAS COMPARATIVAS	VENTAJAS COMPETITIVAS
Características que resisten el proceso de innovación	Características que favorecen el proceso de innovación
Mercados protegidos	Globalización y competencia
Foco macroeconómico	Foco microeconómico
Acceso a líderes	Nivel de productividad de la empresa
Capital financiero y material	Capital humano y de conocimiento
Organizaciones rígidas	Organizaciones flexibles basadas en el mérito
Economías de producción de escala	Estrategias de migración
Método reactivo	Método pro-activo
El Gobierno es el principal estratega	Visión cooperativista y compartida
Distribución de la riqueza	Creación de riqueza
Paternalismo	Innovación

Cuadro 1. Estándares de comportamiento cultural que resisten o favorecen el proceso de innovación basados en ventajas comparativas y competitivas (Lindsay, 2000, p. 291).

Los conceptos anteriores pueden ayudar a entender las dificultades de las empresas para volver a posicionarse en el mundo de la innovación después de un largo periodo de protección industrial. En la Figura 2 se muestra que la interacción entre las empresas y un gobierno proteccionista activan los factores de inhibición de la innovación *económicos* (1); después de un largo período este comportamiento cristaliza en paradigmas inhibidores de tipo *cultural* (2) que inducen a su vez factores inhibidores de *gestión* (3). Estos últimos persisten aun cuando, al mejorar la economía, desaparece los factores de inhibición *económicos*, que, obviamente, también afectan a los *de gestión*. En Cantisani (2006) se presenta un ejemplo de esta situación al caso de la industria en Brasil.

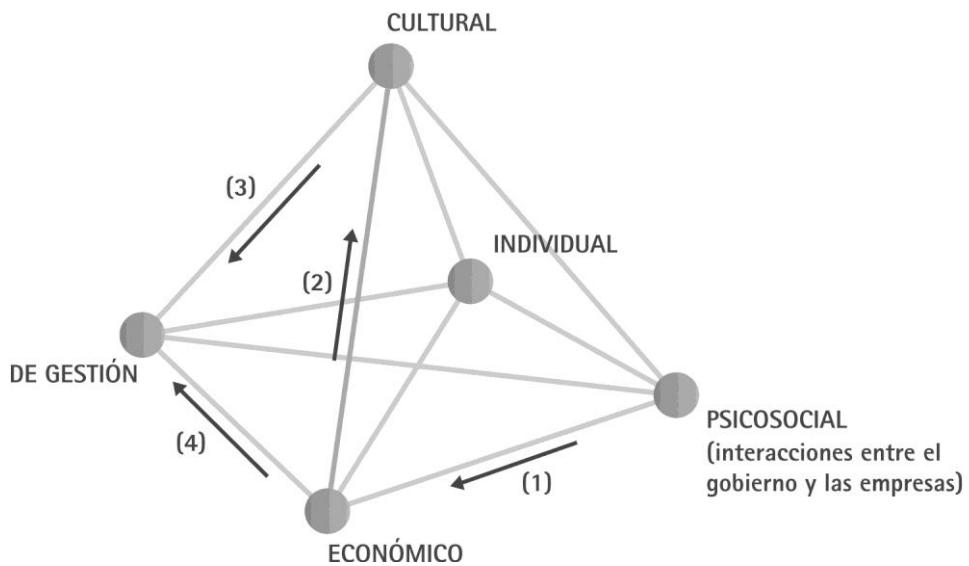


Figura 2. Efectos de una política intervencionista de un gobierno en la economía de mercado de un país (Cantisani, 2006).

TEORÍAS DE LA INNOVACIÓN DE PRIMERA Y SEGUNDA GENERACIÓN

Para muchas personas, y en particular para los más vinculados al mundo de la investigación académica y a la formulación de políticas públicas para la ciencia y la tecnología, el glamour y la importancia relativa de la ciencia mantiene intactos paradigmas muy antiguos, como que “la investigación básica es el marcapasos del progreso tecnológico” o que “un país que depende de otros para su conocimiento científico básico, tendrá una industria que progresará lentamente y su posición en el comercio internacional será débil” (Bush, 1990).

En otras palabras, en la dicotomía aparente entre investigación básica y aplicada uno, según Bush (1990), debería siempre escoger la primera, ya que la segunda, que inicia el proceso de innovación tecnológica, depende de aquella. Esta es la base de la *teoría de la innovación de primera generación* basada en el “empuje de la ciencia” que se muestra en la Figura 3.

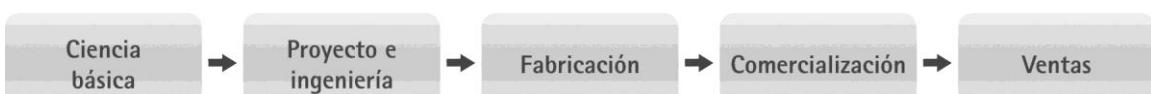


Figura 3. Teoría de la innovación de primera generación basada en el “empuje de la ciencia” (Rothwell, 1992,1994).

Stokes (1997), entre otros, discrepa de esa dicotomía y propone una segunda alternativa (denominada *teoría de la innovación de segunda generación*) basada en el “empuje de la demanda” (Figura 4).

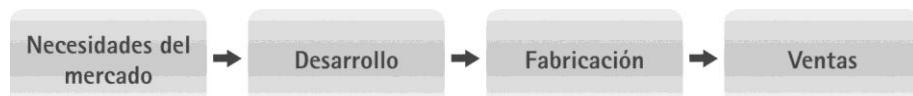


Figura 4. Teoría de la innovación de segunda generación basada en el “empuje de la demanda” (Rothwell, 1999; Stokes, 1997).

El argumento principal de Stokes es que hay investigaciones básicas inspiradas por el uso futuro de los descubrimientos científicos. Como ejemplos propone, entre otros, los trabajos de Pasteur (bioquímica y vacunas) y John M. Keynes (macroeconomía y recesión) y las investigaciones fundamentales del Proyecto Manhattan (fisión nuclear y bomba atómica).

La Figura 5 muestra un modelo dinámico de la interacción entre los desarrollos científicos y tecnológicos donde se aprecian las trayectorias paralelas que pueden fertilizarse entre sí con el uso de los resultados de investigaciones básicas del tipo de la de Pasteur, u otras como las mencionadas en el párrafo anterior (Stokes, 1997).

Estas consideraciones son importantes en muchos países como España donde hay todavía una brecha importante entre los participantes en la trayectoria de la izquierda (ej. Universidades) y Centros de I+D y los de la derecha (ej. las empresas).



Figura 5. Modelo dinámico de la innovación (Stokes, 1997, p.88).

Las universidades y los centros de I+D, con afortunadamente cada vez más excepciones, siguen usualmente la trayectoria de la izquierda de manera relevante y compatible con las tendencias en investigación básica de los países más desarrollados. Esto facilita las publicaciones en revistas de prestigio y la participación en proyectos y foros de investigación internacionales.

Las empresas, por otra parte, siguen típicamente la trayectoria de la derecha, con gran dependencia de los resultados de la investigación llevada a cabo en países más avanzados, y, en muchos casos, solo interesadas en *saber cómo* hacer las cosas, que en *saber por qué* las cosas se deben hacer de una determinada manera, ignorando así que cualquier desarrollo es más efectivo si se hace uso del método científico y del conocimiento acumulado en disciplinas científicas o técnicas.

TEORÍA DE LA INNOVACIÓN DE TERCERA GENERACIÓN ENFATIZANDO LA CONCEPCIÓN DE NUEVAS IDEAS

Las ideas anteriores han dado paso a lo que podríamos denominar *teoría de la innovación de tercera generación*. Esta teoría plantea una relación más compleja entre los diferentes factores que intervienen en el proceso de innovación; estos son la *nueva idea* (**I**), la *investigación básica* (**B**) y *aplicada* (**A**), *actividades de desarrollo experimental* (**D**), tales como la construcción y ensayo de prototipos y plantas piloto, la elaboración de programas de software que resuelvan problemas concretos, etc., el *sector productivo* (**P**) y el *mercado* (**M**), incluyendo en éste el marketing, la distribución y las ventas. La Figura 6 muestra un esquema de las posibles relaciones entre estos factores donde las letras en cada vértice denotan cada uno de los factores mencionados. Adviértase que todos los factores están conectados entre sí; las conexiones principales entre ellos se representan con una flecha llena y las conexiones secundarias (de menor importancia) con una flecha a trazos. Es interesante destacar también que la investigación básica se considera fuera del tetraedro principal, e incluso algunos autores la suponen fuera totalmente del bucle de la innovación, suponiendo que los resultados de la investigación básica son de dominio público y que, por tanto, cualquier proceso de innovación empieza invariablemente por la investigación aplicada (Cantisani, 2006).

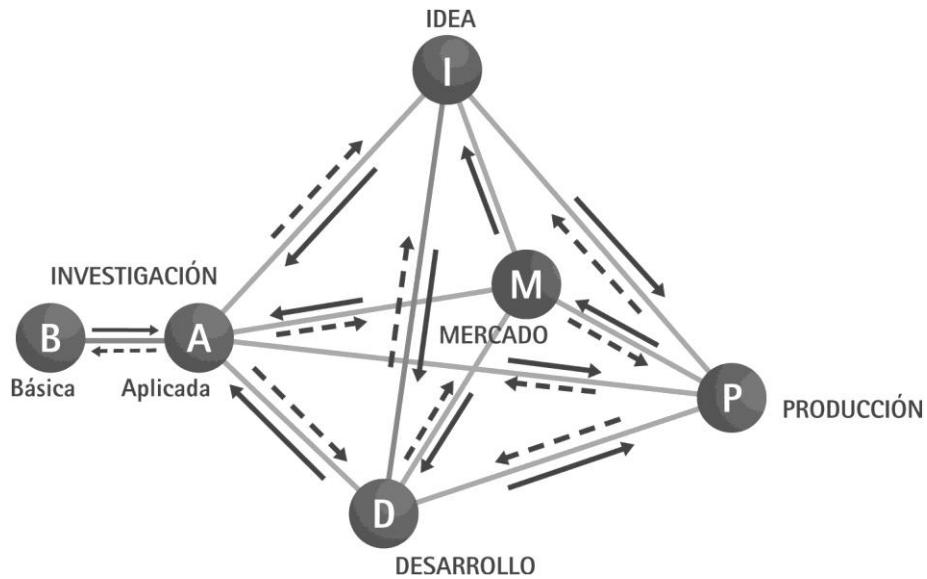


Figura 6. Esquema geométrico de un proceso de innovación interactiva.

El sencillo esquema lineal de la teoría de la innovación de primera generación de la Figura 1 se representaría por la secuencia **A → D → P → M**. Después de las actividades de investigación aplicada (**A**) se procede a fabricar y probar prototipos del futuro producto (**D**), tras ello se incorpora a un sistema de producción (**P**) y finalmente se lanza al mercado (**M**).

Por otra parte, el esquema en la teoría de la innovación de segunda generación sería el inverso, es decir **M → A → E → M**.

Una actividad clave en el proceso de innovación es la concepción de nuevas ideas (**I**), durante el cual se conciben y proponen ideas innovadoras, generalmente en conflicto con uno o varios de los factores de inhibición antes mencionados. Además, la realidad es raramente tan lineal como en los dos ciclos descritos en las teorías de innovación de primer y segunda generación. Es por ello que la *teoría de la innovación de tercera generación* se denomina también *teoría de la innovación interactiva* (Rothwell, 1992, 1994).

De hecho la mayor parte de las innovaciones se inician por el mercado. Así cuando se identifica una oportunidad para un nuevo producto o proceso en **M**, se concibe una idea original en **I** (**M → I**), generalmente con esquemas de un producto o proceso preliminar que permiten construir y probar un primer prototipo (**I → D**). Si los datos recogidos en esas pruebas son suficientes se fabrica el producto o sistema final (**D → P**). Es el momento entonces de poner el producto en el mercado (**P → M**). Por tanto el ciclo completo de actividades es **M → I → D → P → M**.

Si los datos compilados en **D** no son suficientes, por ejemplo, para encontrar los coeficientes de un modelo matemático de un nuevo fenómeno, se tiene que acudir generalmente a **A**, o incluso a **A+B** si el conocimiento de dominio público no es suficiente para resolver el problema. Por otro lado, si el problema es totalmente nuevo , uno debe acudir a **I**, a través de una actividad paralela secundaria, caracterizada por la línea a trazos de la Figura 6, para allí formular una nueva idea y desarrollarla en **A** (o en **A+B**). Una vez resuelto el problema se retorna a **D** para completar la recogida de datos. También, si el problema no es tan difícil, se puede pasar directamente de **D** a **A**, y esta es la orientación prevalente de los enlaces entre **D** y **A** y no la opuesta, como se presupone en la expresión R+D y en la teoría del empuje de la ciencia hacia la tecnología, antes mencionada. Por tanto, el ciclo completo de actividades sería **M → I → D → I → A (o A+B) … D → P → M**, o en el caso más simple **M → I → D → A (o A+B) … D → P → M**.

Cantisani (2006) ha analizado otros ciclos para desarrollo de productos y procesos que exigen mayores o menores dosis de conocimiento del *por qué* de las cosas, para casos en que no se dispone de suficientes datos de partida, o cuando hay incertidumbres asociadas con las actividades y otras situaciones.

UNA PROPUESTA DE CICLO PRODUCTIVO DE LAS IDEAS

En base a lo expuesto en apartados anteriores podemos preguntarnos si existe un recorrido típico para las ideas, desde que surgen en la mente de un investigador hasta que se transforman en un éxito comercial cuyos beneficios podrían revertir en la concepción y desarrollo de nuevas ideas. En las líneas siguientes describiremos cómo las ideas, antes de transformarse en un producto exitoso, siguen un ciclo que tiene etapas muy marcadas que no conviene saltarse para llegar a la meta en las mejores condiciones para el triunfo deseado; es decir para que el producto resultante de la idea sea un éxito en el mercado.

Estas reflexiones son fruto de las experiencias del autor como director durante más de 25 años del Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE) un centro de I+D+I especializado en el desarrollo y aplicación de métodos numéricos en prácticamente todos los ámbitos de la ingeniería y las ciencias aplicadas. CIMNE se constituyó en 1987 por Consorcio entre la Generalitat de Cataluña y la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Para más detalles sobre CIMNE se sugiere visitar www.cimne.com .

La rentabilidad de la investigación científica

Cuando se habla de la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación tecnológica (I+D+I en siglas que yo escribo todas en mayúsculas (Oñate, Cinco Días, Julio 2009) es frecuente confundir fines, medios y responsabilidades. Periódicamente, y más en tiempos de crisis económica, se pone de moda exigir que los grupos que investigan en Universidades y Centros de I+D, sean “rentables.” Es decir, se pretende que su investigación se financie con créditos públicos, que los resultados de la misma se implementen en el mercado rápidamente y que los beneficios de su comercialización sirvan para devolver los créditos y para refinanciar esos grupos. También parece que se echa de menos que las empresas investiguen más, es decir, que inviertan recursos en descubrir nuevos conocimientos. El límite caricaturesco de esas aspiraciones sería pretender que las empresas produjeran premios Nobel y que un grupo universitario estuviera entre los 10 primeros puestos en el ranking de la actividad económica de un país. Ciertamente, esto no es imposible, pero es altamente improbable. Lo contrario desgraciadamente es más frecuente. Es decir, que los investigadores universitarios en su afán por la supervivencia económica de sus grupos, descuiden sus tareas investigadoras y que las empresas, confundiendo lo que es un Departamento Técnico o de Proyectos, con un Departamento de Innovación, se consideren autosuficientes y menosprecien u obvien el contacto con el mundo de la I+D real (Frascati, 2002).

Cómo funciona el Ciclo de las Ideas

Los conceptos anteriores creo que se pueden aclarar bastante si analizamos lo que podríamos denominar el **Ciclo Productivo de las Ideas** (o más brevemente, el **Ciclo de las Ideas**). La Figura 7 presenta un esquema del periplo de una idea, desde que surge hasta que se transforma en un éxito industrial o comercial. Tal y como sucede en otros ciclos biológicos o medio-ambientales (el ciclo del agua, por ejemplo), las cadencias y tempos son muy importantes y trastocarlos conduce a resultados negativos. Veamos.

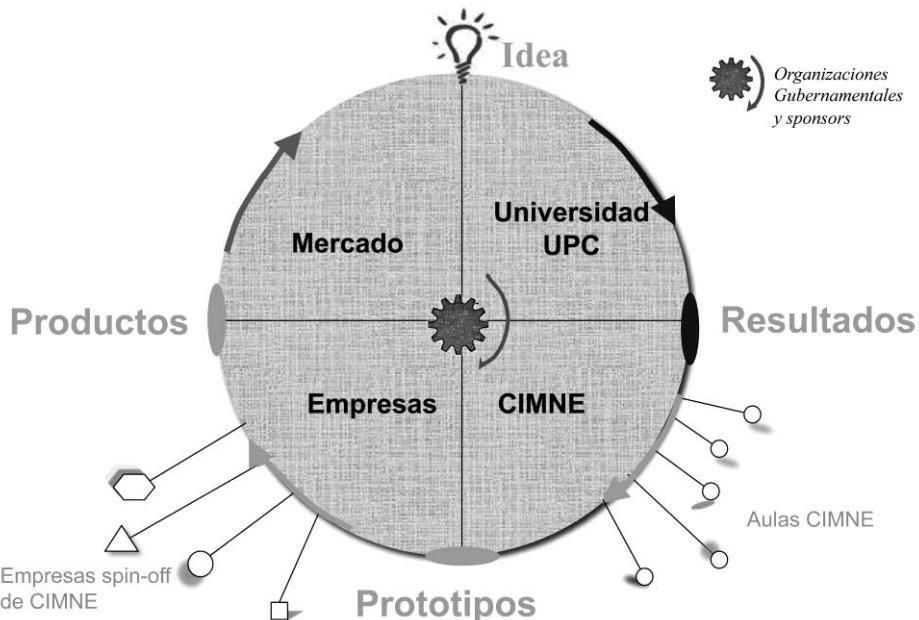


Figura 7. El Ciclo de las Ideas en el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE, www.cimne.com).

Para simplificar la explicación supondremos en lo que sigue que las nuevas ideas (y aquí me refiero a avances de tipo científico con posibilidades de ser aplicados por la industria) surgen en entornos universitarios, en los que trabajan unos profesionales cuya misión fundamental es pensar, estudiar, investigar y eventualmente descubrir nuevos conocimientos. Los conceptos que siguen son, sin embargo, fácilmente extrapolables al caso en que las ideas surjan en empresas y evolucionen desde allí, tal y como se ha descrito en un apartado anterior. Cada idea (el nuevo conocimiento) sería equivalente a una semilla que siendo importante (esencial) está muy lejos de ser un fruto.

La idea madura en su recorrido por el primer cuadrante del ciclo que representa la Universidad (por ejemplo la UPC en la Figura 7), hasta que produce resultados tangibles (tesis, publicaciones científicas, programas de ordenador, máquinas o instrumentos “de autor”, etc.). Estos resultados si no se catalogan y protegen, se pierden con suma facilidad. Esto conduce a repeticiones o duplicaciones indeseables.

¿Qué hacer pues con los resultados de una idea? Lo óptimo es que evolucionen hasta un nivel de “prototipo”; es decir hasta convertirse en algo (un sistema, un programa de ordenador, etc.) que funcione de manera contrastable en manos de una persona diferente del autor. Pasar del resultado al prototipo no es trivial y exige una organización, un

personal competente y unos recursos de los que generalmente no dispone un grupo universitario. La solución es que el periplo de la idea continúe en organismos especializados adyacentes a la Universidad, y cuya misión sea transformar el conocimiento en cosas (prototipos) tangibles.

En los últimos años se han creado muchos organismos de este tipo en España. Un ejemplo es CIMNE, antes mencionado, pero hay otros muchos en diferentes ámbitos de la ciencia y la técnica. En la práctica se clasifican estos organismos en Centros de Investigación y Centros Tecnológicos. Estas son en mi opinión distinciones engañosas, pues parecen sugerir que unos centros tienen que investigar y no preocuparse de la tecnología y los otros al revés. Lo cierto es que la investigación y el desarrollo tecnológico son actividades imprescindibles en ambos, tal y como remarcaremos en un apartado posterior. Lo esencial es, en definitiva, que los centros de ambas categorías tengan la capacidad de engranarse con el mundo universitario e industrial de manera efectiva y con una visión práctica.

Universidad y empresa

¿Puede un prototipo lanzarse al mercado con garantía de éxito? No. La distancia entre un prototipo y un producto es generalmente muy larga. Conseguir un producto es una actividad en sí misma y mezclarla con la I+D es contraproducente y conduce a frustraciones. Los productos se tienen que desarrollar en empresas en las que auténticos especialistas dediquen su tiempo y talento en exclusiva a la obtención, validación y documentación de un producto, y también a definir el plan para su posterior comercialización.

Una vez que un producto ha visto la luz en el mercado entraría en el cuarto cuadrante del ciclo. Allí el objetivo es el éxito comercial. Para ello la empresa deberá establecer las alianzas necesarias en todo el mundo. El ciclo se cierra con el retorno de parte de los beneficios obtenidos en la comercialización del producto al organismo de partida (la Universidad).

Naturalmente “la velocidad de giro” de la idea en su ciclo puede aumentar con la ayuda de Organismos Gubernamentales u otro tipo de “sponsors”, tal y como se indica simbólicamente con el engranaje situado en el centro del círculo en la Figura 7.

UN CICLO DE LAS IDEAS REFINADO

La Figura 8 muestra un refinamiento del Ciclo de las Ideas original de la Figura 7 en el que se ha incluido dentro de cada cuadrante las actividades de investigación básica (**B**) y aplicada (**A**), desarrollo tecnológico (**D**), producción y fabricación (**P**) y mercado (incluyendo marketing y ventas) (**M**).

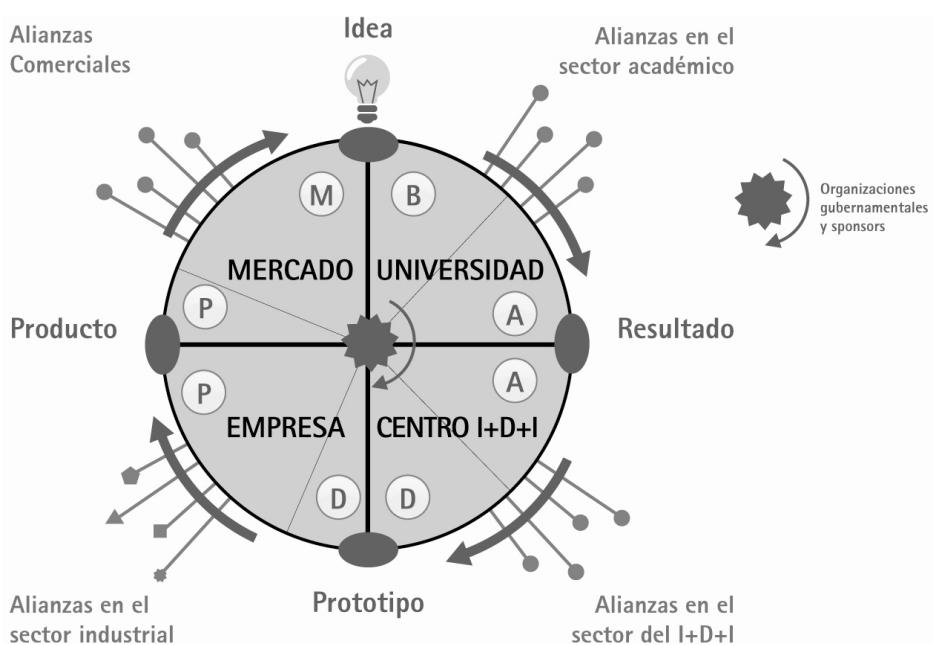


Figura 8. El Ciclo de las Ideas incluyendo en cada cuadrante del ciclo las tareas de investigación básica (**B**), investigación aplicada (**A**), desarrollo tecnológico (**D**), producción (**P**) y mercado (**M**).

Claramente, en el recorrido de la ideas dentro del primer cuadrante esta progres a través de la investigación básica (**B**) y aplicada (**A**), realizada generalmente en la universidad o en centros de investigación. La proporción de investigación básica o aplicada será cuestión de la mayor o menor necesidad de la primera para el progreso de la idea hacia los resultados.

Dentro del segundo cuadrante, y en general dentro de un Centro de I+D+I (representando, tanto a un Centro de Investigación como a un Centro Tecnológico), los resultados de la investigación evolucionan hacia un prototipo a través fundamentalmente de actividades de investigación aplicada (**A**), seguidas de los desarrollos tecnológicos (**D**) necesarios para que el prototipo sea una realidad.

En la empresa (tercer cuadrante), puede ser necesario proseguir con esos desarrollos (**D**) antes de pasar a la fase de fabricación del producto (**P**). Finalmente, ya en el último cuadrante, se procede a la comercialización del producto mediante su lanzamiento al mercado (**M**), para la cual puede ser necesario mejorar el proceso de fabricación del producto (**P**).

Dentro de cada cuadrante se establecen las alianzas estratégicas adecuadas con el sector académico (primer cuadrante), el sector del I+D (segundo cuadrante) y el sector industrial (tercer cuadrante), así como las alianzas comerciales necesarias (cuarto cuadrante).

¿DÓNDE ESTÁN LAS DIFICULTADES PARA EL ÉXITO EN LA TRANSFERENCIA DE LOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN AL MERCADO?

El Ciclo de las Ideas presentado en apartados anteriores parece muy sencillo, pero realmente es muy difícil de poner en práctica. ¿Dónde están las dificultades?

Apuntaré sólo tres, que, por decirlo de alguna manera, son características de nuestro país. La primera es la falta de percepción de los *límites* de una organización. Los humanos somos limitados y las organizaciones también. En la práctica sólo se hacen bien las cosas dentro de los límites de cada uno. La Universidad no tiene las "competencias" de una empresa y viceversa. Salirse de esos límites jugando a ser empresarios (las universidades) y científicos (las empresas) es una tentación, a la que sucumben muchos grupos en la academia y en la industria, con escasísimos ejemplos de éxito.

La segunda dificultad reside en la usual carencia de *interfaces* adecuadas entre todos los agentes que intervienen en el proceso de transformación de una idea (universidad, Centros de I+D, Centros Tecnológicos, empresas, organismos de sponsorización, etc.). Estas interfaces requieren, entre otras cosas, personas con capacidad para entender los problemas y requerimientos a ambos lados del "cuadrante".

Finalmente, son muy importantes las *alianzas* en todas las direcciones. Los grupos universitarios, los Centros de I+D y los tecnológicos y las empresas han de tejer a su alrededor una red de organismos de todo tipo a nivel nacional e internacional con los que compartir, desarrollar y explotar conocimientos. Ejemplos de esto, entre otros muchos, son la Red de Aulas que CIMNE tiene en España y Latinoamérica en colaboración con

universidades y las diferentes empresas de base tecnológica que desde CIMNE se han creado (para más detalles ver www.cimne.com y www.cimnetecnologia.com).

LAS TRES ÍES QUE IMPORTAN

Como hemos visto repetidamente en el texto, hay tres palabras que comienzan por la letra i que tienen un significado importante para el avance de la ciencia y la tecnología y, naturalmente, también para la transferencia de la tecnología a la industria. Las dos primeras palabras son *investigación e innovación*. Es curioso que en su abreviatura coloquial: I+D+i, por investigación, desarrollo tecnológico e innovación tecnológica, la primera se escriba con mayúscula y la segunda con minúscula. Fuera de cualquier aspecto gramatical, parece que el inventor del acrónimo concedió mas importancia a investigar que a innovar. Es cierto que la investigación, la búsqueda de lo nuevo, viene seguida, como hemos visto en apartados anteriores, de un proceso de desarrollo de la idea inicial hasta conseguir un resultado, una tecnología. Ha quedado también patente en el texto que la innovación tecnológica consiste en poner en valor esa nueva tecnología en la industria. Sin investigación, por tanto, no hay innovación, pero sin esta el mundo no se beneficiaría cuando algo nuevo y mejor existe. Ambas actividades son igualmente importantes y lo que interesa es invertir para que tengamos los mejores investigadores y los más eficaces innovadores. Yo abogo, por tanto, por igualar el tamaño de ambas íes.

A esas dos palabras hay que añadir otras dos que también empiezan por i y que se entrelazan todas ellas; son *interdisciplinariedad e internacionalización*. La primera significa que toda investigación es hoy en día un punto de encuentro de saberes, solo en apariencia, disjuntos. Reconocer el valor de la interdisciplinariedad es promover la fusión de áreas del conocimiento separadas por razones administrativas o corporativas. Esto se consigue creando espacios de trabajo en colaboración en nuestras universidades, centros de I+D y tecnológicos, donde especialistas en ingeniería, ciencias experimentales y medicina, por poner un ejemplo, puedan enfrentarse conjuntamente a los retos que afectan a la humanidad este milenio. Los resultados de la investigación interdisciplinar, fácil de plantear pero muy difícil de poner en práctica, serán sin duda nuevos descubrimientos y productos innovadores.

La internacionalización, finalmente, expresa que todas las actividades científico-técnicas han de tener una proyección global. Los centros de I+D han de captar los mejores expertos y trabajar en consorcio con los grupos punteros a nivel mundial, tanto en investigación como en innovación. También han de exportar sus capacidades convirtiéndose en operadores globales del saber.

UNA VISIÓN HOLÍSTICA DE LA INVESTIGACIÓN

Es importante que cualquier organización que dedica una parte de su actividad a la investigación básica o aplicada (sea una universidad, un centro de I+D, un centro tecnológico o una empresa) sea capaz de integrar de manera armoniosa los cuatro elementos que, en mi opinión, son necesarios para el éxito de esa investigación: una definición clara del problema, producto o proceso (**P**) a cuya solución o mejora va dirigida la investigación; la utilización de modelos y técnicas de predicción cuantitativas, generalmente denominados modelos de cálculo (**C**) que tratan de explicar el comportamiento de **P** a través de métodos numéricos y programas de simulación por ordenador; la utilización de medidas experimentales (**M**) con el fin de validar los desarrollos en **C** mediante ensayos físicos en modelos a escala real o reducida de **P**. En **M** se incluye también la utilización de sensores o cualquier dispositivo que permita ofrecer información de tipo experimental sobre el comportamiento de **P**, o de modelos de **P**. Finalmente, es esencial hacer uso del conocimiento existente (**K** de “knowledge”), para facilitar las tareas en **C** y **M**. La Figura 9 muestra un esquema de las relaciones entre **P**, **C**, **M** y **K** colocadas cada una en un vértice de un tetraedro.

Adviértase que **P**, **C**, **M** y **K** están conectadas entre sí por líneas que representan el flujo de información entre cada actividad (por ejemplo a través de internet).

Para aclarar conceptos, imaginemos, por ejemplo, que se desea desarrollar un nuevo modelo de automóvil. Simplificado el flujo de tareas, tras la concepción inicial del vehículo en **P**, se procedería a simular su comportamiento en **C**, utilizando métodos numéricos y software de simulación por ordenador ya existentes, (provenientes de **K**), u otros nuevos desarrollos especialmente para ese fin en **C**. En paralelo, se procedería a

ensayar en **M** el comportamiento del vehículo, o sus partes, en modelos físicos, utilizando los resultados de los ensayos para calibrar y validar los resultados obtenidos en **C**.

Obviamente, dependiendo de la cantidad de conocimiento previo (**K**) y, por tanto de la necesidad de actividades en **C** y **M**, la intensidad de la interrelación entre **P**, **C**, **M** y **K** será mayor o menor.

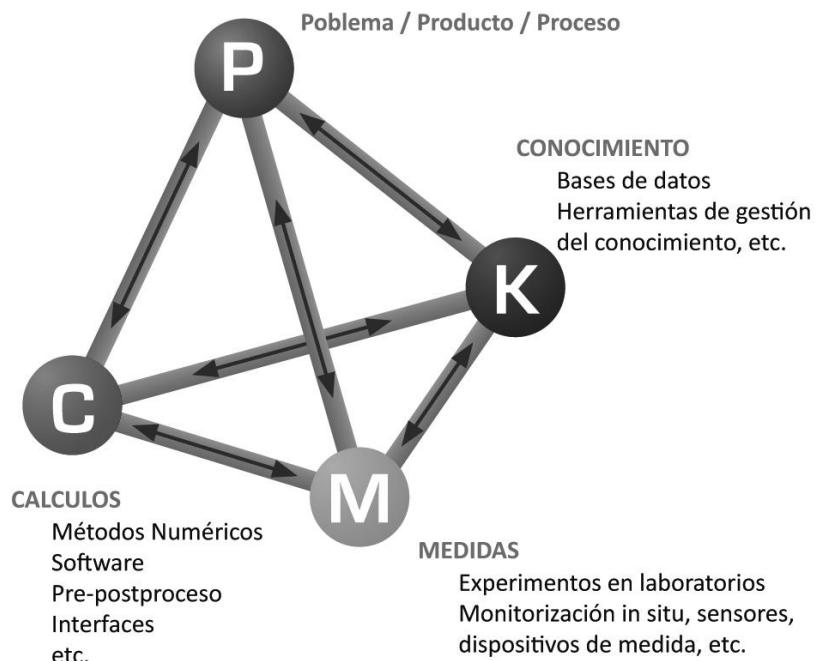


Figura 9. La conexión entre el producto, proceso o problema (**P**), las actividades de cálculo (**C**) y experimentales (**M**) y el conocimiento existente (**K**).

El tetraedro de la Figura 9 refuerza, en definitiva, la idea de una visión integral (holística) de la investigación, que tenga en cuenta todos los elementos necesarios para que sus resultados sean provechosos para el fin que se persiga. Estos conceptos son válidos para cualquiera que sea ese fin, mientras esté bien definido y la investigación tenga, en definitiva, alguna aplicación posible, aunque sea a largo plazo.

DE ORGANIZACIÓN BUENA A GRAN ORGANIZACIÓN

J. Collins en su iluminador libro *Good to Great* [Collins, 2001] establece siete grandes criterios que debe satisfacer toda empresa que quiera dar el salto de *buena a gran empresa*. Lo interesante es que la mayor parte de esos criterios son *directamente aplicables*

a cualquier organización, sea esta una empresa, una universidad o un centro de I+D+I. Esos criterios son:

- *Liderazgo de nivel 5.* La organización necesita líderes que combinen humildad personal y determinación profesional.
- *Primero quién... y después qué.* Seleccionar primero a las personas adecuadas es mucho más importante que definir una nueva visión o estrategia.
- *Enfréntate a las duras circunstancias (pero no pierdas la fe).* En época de crisis, aprendamos de los prisioneros de guerra y su afán por sobrevivir a los embates más terribles.
- *El concepto de erizo.* (Simplicidad dentro de los Tres Círculos). La fábula de la zorra y el erizo que siempre acaba ganado la partida (Berlín, 1993) nos recuerda que algunas personas (los zorros) persiguen muchos objetivos a la vez y ven el mundo en su complejidad, pero son incapaces de integrar en su mente un concepto *unificado global* o una visión sintética de los problemas o las metas a alcanzar. Los erizos, por otra parte, simplifican un mundo complejo en una única idea sencilla bien organizada, y el resto de cosas son irrelevantes para ellos. Las conclusiones de la fábula cristalizan en la importancia para cualquier organización, o incluso una persona, de entender la intersección de los tres círculos siguientes :
 - 1) Lo que puede hacer mejor que nadie más en el mundo.
 - 2) Lo que impulsa su motor económico.
 - 3) Lo que tiene verdadera pasión por hacer.

Entender los conceptos que conforman la intersección de esos tres círculos (mucho más que intentar conseguir cada uno de ellos por separado) es el objetivo esencial de la persona u organización que está destinada a ser algo grande.

- *Una cultura de la disciplina.* La alquimia mágica para lograr algo grande es combinar una cultura de la disciplina con una ética del emprendimiento.
- *La noria y el bucle de la desilusión.* Para Collins (2001), las buenas empresas no pasan a ser grandes de repente, o a través de una revolución o un cambio drástico de programas o re-estructuras. Estas actitudes típicamente conducen a bucles frustrantes.

Más bien el proceso de pasar de empresa buena a grande se parece al movimiento de una noria gigante que avanza lentamente hasta adquirir la cantidad de movimiento necesaria de manera que cueste detenerla.

- *Aceleradores de la energía.* Las buenas empresas que quieren ser grandes piensan diferente del papel de la tecnología. El tema es tan relevante que bien merece dedicarle un apartado exclusivo.

ACELERADORES DE LA TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA EN EMPRESAS

Se relacionan a continuación algunos de los factores que permiten acelerar el proceso de transferencia y asimilación de las nuevas tecnologías por empresas (Collins, 2011). Naturalmente, muchos de esos factores son también aplicables a otras organizaciones de tipo gubernamental, o incluso académico.

- Las empresas que pasan de ser *buenas* empresas a *grandes* empresas (buenas a grandes o **bag**, en lo sucesivo) piensan diferente sobre la tecnología que las mediocres.
- Las empresas **bag** evitan las modas tecnológicas, y se convierten en pioneras en la aplicación de tecnologías *seleccionadas cuidadosamente*.
- La pregunta básica sobre cualquier tecnología es ¿encaja la tecnología con el concepto de punta de lanza para la empresa? Si es así, la empresa **bag** debe convertirse en pionera en la aplicación de esa tecnología. En caso contrario, es mejor ignorarla totalmente.
- Las empresas **bag** utilizan la tecnología como un *acelerador* de su impulso, no como su creador. Ninguna de las compañías **bag** en US analizadas por Collins (2011) comenzaron su transformación con tecnología pionera, sin embargo todas se convirtieron en pioneras en la aplicación de la tecnología una vez que interiorizaron cómo encajaba con la estrategia de la empresa.
- Lo esencial son los resultados que se obtienen de la explotación de la tecnología puntera y no la tecnología en sí misma. Así, las empresas **bag** no están, en general, preocupadas por el acceso de sus competidoras a esa tecnología, siempre que mantengan la ventaja en su explotación.
- Cómo reacciona una empresa a los cambios tecnológicos es un buen indicador de su potencial intrínseco para ser grande versus la mediocridad. Las empresas **bag**

responden con reflexión y creatividad, motivadas por el deseo de transformar la oportunidad que ofrece la nueva tecnología en resultados explotables por la empresa. Las compañías mediocres reaccionan tambaleándose, motivadas por el miedo a quedarse atrás.

- La idea de que un cambio tecnológico es la principal causa de un declive de empresas que una vez fueron grandes (o de la mediocridad perpetua de otras), no está contrastada por la evidencia. Ciertamente una empresa **bag** no puede permitirse el lujo de quedarse rezagada tecnológicamente y no querer ser grande, pero la tecnología por sí misma no es nunca la raíz de grandeza o declive de una empresa.

LA NECESIDAD DE UN NUEVO MODELO DE CENTRO DE I+D+I

Los rápidos avances en el mundo industrializado confrontan a los países con nuevos problemas que deben resolver si quieren estar en la primera línea de la tecnología.

Por otra parte, términos como investigación y tecnología deben actualizarse teniendo en cuenta la evidencia de que la distancia entre el mundo de las ideas y los descubrimientos se acerca más cada día.

Así, está aceptado universalmente que los resultados de la investigación solo son útiles si pueden aplicarse, de una forma u otra. A un nivel meramente conceptual, tecnología, en el sentido más amplio, puede visualizarse como las plantas de un edificio (cuanto más alto el piso más alta la tecnología) sostenido por pilares (que representan la investigación aplicada). Estos pilares están embebidos en una cimentación (representando la investigación básica) que da estabilidad al conjunto del edificio (Figura 10).

La unión natural de los mundos de la investigación (básica y aplicada), y la tecnología representada en el edificio de la Figura 10, nos obliga a un cambio de paradigma en el modus operandi de las organizaciones que aspira a liderar los grandes cambios en ciencia aplicada y tecnología en el siglo 21 a nivel mundial.

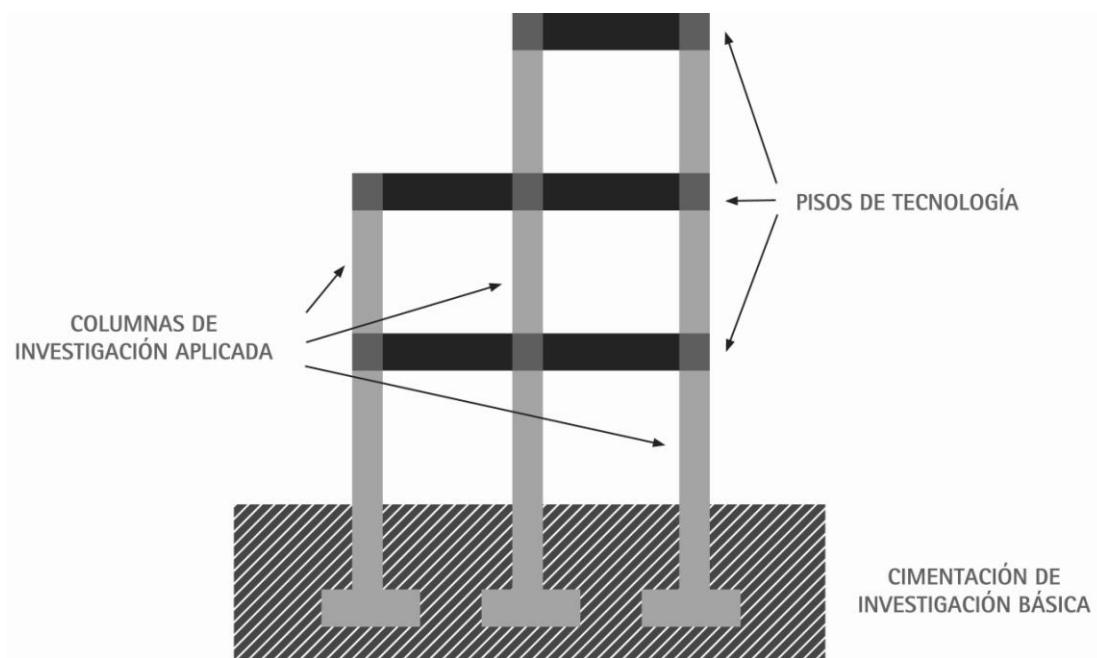


Figura 10. El edificio de la investigación y la tecnología

Como se ha mencionado en un apartado anterior, en España, se ha consolidado una dicotomía artificial, y en mi opinión perniciosa, entre Centros de Investigación (CI) y Centros Tecnológicos (CT). Así, en general, se supone que los CI deben focalizarse en actividades de investigación básica, medidas generalmente en forma de publicaciones en revistas científicas, mientras que los CT deben dedicarse a desarrollar soluciones tecnológicas para resolver problemas que la industria plantea.

Las experiencias en el modelo actual de CI y CT en España muestran que hay una necesidad urgente de definir una nueva categoría de organización que reúna las características esenciales de un CI y un RT. Existe, por tanto, la gran oportunidad (y necesidad) de crear nuevas organizaciones de I+D+I, formadas por centros individuales o por asociaciones o alianzas entre varios centros, cuya misión sea promover y realizar actividades de I+D+I, en el sentido amplio del acrónimo. El objetivo final es que dichas organizaciones sean excelentes en la investigación (básica y aplicada), en el desarrollo de los resultados de la misma hasta llegar a prototipos y en la transferencia de dichos resultados y todo el conocimiento asociado, al sector industrial.

En España existen algunos ejemplos del nuevo modelo de organización de I+D+I que arriba se propugna. Entre ellos solo mencionaremos aquí la K4 Research Alliance formada por CI y CT en el País Vasco y la incipiente organización ARTIC en Cataluña,

formada por la alianza entre CIMNE, Barcelona Media y el Centro Tecnológico de Manresa. Es de esperar que en un futuro surjan y se consoliden nuevas organizaciones de I+D+I que persigan los objetivos antes mencionados.

POLÍTICAS DE INCENTIVO DEL I+D+I

Si se asumen los conceptos desarrollados en este texto y , más concretamente , los inherentes al Ciclo de las Ideas, se puede intuir mejor la dificultad y/o conveniencia de implementar según que políticas o iniciativas para estimular la ciencia y la innovación tecnológica. Así, es irreal que una universidad pueda obtener beneficios a corto o medio plazo de la explotación de los resultados de una idea. Por ello, financiar con créditos, en lugar de subvenciones, la investigación de las universidades y los centros de investigación, está abocado al fracaso. Sí que sería interesante, en cambio, que una parte de las subvenciones vayan ligadas al éxito en la investigación, validado en forma de resultados contrastables. Por otra parte, la política de incentivos a la innovación en los centros tecnológicos, los nuevos Centros de I+D+I y las empresas debería contemplar la modalidad de préstamos no retornables, en el caso de éxito en la consecución de un producto novedoso (Oñate, Expansión 2009).

Con todo ello se pondría el énfasis en incentivar la *consecución del éxito* de las actividades de I+D+I.

El fin sería siempre el mismo, conseguir que una buena idea se transforme en algo útil y rentable.

Referencias

- [1] I. Berlin. *The hedgehog and the fox*. Elephant Paperbacks, Chicago, 1993.
- [2] V. Bush. *Science—The Endless Frontier: A Report to the President on a Program for Postwar Scientific Research*, Reprint. National, Science Foundation, Washington, DC, 1990.
- [3] Britannica. Great Books of The Western World, vol. **11**, Euclid, Archimedes, Apollonius of Perga, Nicomachus. *Encyclopaedia Britannica*, Inc., Chicago 1971.
- [4] Britannica. *Encyclopaedia*, DVD (Digital Video Disk). Encyclopaedia Britannica, Inc., Chicago, 2001.
- [5] A. Cantisani, Technological innovation processes revisited. *Technovation*, **26**, 1294-1301, 2006.
- [6] J. Collins, *Good to Great. Why some companies make the leap and others don't*. Harper Collins Publishers Inc., 2001.
- [7] Frascati Manual. Proposed standard practice for surveying on research and experimental development, OECD, Paris, 2002.

- [8] S. Lindsay. Culture, mental models, and national prosperity. In: Harrison, L.E., Huntington, S.P. (Eds.), *Culture Matters—How Values Shape Human Progress*. Basic Books, New York (a member of the Perseus Books Group), 2000.
- [9] E. Oñate. El Aura de los Números. Real Academia de Doctores, Barcelona, 1998.
- [10] E. Oñate, Sobre íes grandes y pequeñas. *Cinco Días*, viernes 24 de julio de 2009.
- [11] E. Oñate, Estímulos anticrisis. *Expansión*, Viernes 9 de Octubre de 2009.
- [12] E.M. Rogers. *Diffusion of Innovations*, fourth ed. The Free Press, New York, 1995.
- [13] R. Rothwell, Successful industrial innovation: critical factors for the 1990's. *R&D Management*, **22**, 221-239, 1992.
- [14] R. Rothwell, Industrial innovation: success, strategy, trends. In Dogson, M., Rothwell, R. (Eds.). *The Handbook of Industrial Innovation*. Edward Elgar, United Kingdom, 1994.
- [15] G.B. Shaw. Maxims for revolutionists: reason (1903). In *Man and Superman: A Comedy and a Philosophy*. Indypublishing Co., New York, 2002.
- [16] D.E. Stokes, *Pasteur's Quadrant – Basic Science and Technological Innovation*. Brookings Institution Press, Washington DC, 1997.
- [17] C.M. Vest. Pursuing the Endless Frontier. The MIT Press, 2005.