

## ALOCUCIÓN DEL PROFESOR DR. MATEO VALERO CORTÉS

Rector Magnífico  
Autoridades académicas  
Distinguidos doctores  
Señoras y señores

Me gustaría agradecerles, en nombre de mis colaboradores en las tareas de la investigación, de mi familia y en el mío propio, esta distinción tan querida y apreciada que vuestra universidad me otorga. El Doctorado Honoris Causa es la más alta distinción que una Universidad puede conceder y he de decirles que lo recibo con una gran alegría y con una mayor humildad. Entiendo que es un reconocimiento a la investigación, y en ese sentido quiero compartir este gran honor con mis estudiantes de doctorado y colaboradores con los que vengo trabajando desde hace muchos años, intentando diseñar mejores computadores, que son máquinas que han cambiado mucho nuestro día a día así como la forma de hacer ciencia. Sin ellos, no habría podido hacer nada.

Estoy orgulloso de recibir este reconocimiento de la Universidad de la tierra donde nací, Aragón, y, si me permitís, también de mi Universidad, ya que en el curso 1969-70 realicé mi primer año de carrera, y a partir de ahora formaré parte de su claustro de profesores.

Quiero agradecer al BIFI, Instituto Universitario de Investigación de Biocomputación y Física de Sistemas Complejos, y a su fundador y primer director el añorado profesor José Félix Sáenz, y a Alfonso Tarancón por tomar la iniciativa de la propuesta, al Centro Politécnico Superior, y a su director, el profesor Enrique Masgrau, al Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas, tanto a su director, Joaquín Ezpeleta, como a sus profesores Víctor Viñals y Manuel Silva, a los profesores que se sumaron a esta iniciativa, así como a la Comisión de Investigación de la Universidad por el informe favorable que envió al Consejo de Gobierno de la Universidad para la aprobación de este Doctorado Honoris Causa. Muchísimas gracias a todos.

Os diré que tengo en estos momentos sensaciones de alegría y de nostalgia..., han pasado tantos años desde que formé parte por primera vez de nuestra querida Universidad de Zaragoza... No hace falta deciros, una vez más, que me siento aragonés desde los pies a la cabeza y que, por lo tanto, cualquier reconocimiento que viene de mi tierra tiene para mí un significado muy especial.

Nací en Alfamén, pueblo famoso por sus melones y sandías, así como por su vino. Allí pasé mi infancia hasta que vine a Zaragoza. Alfamén era entonces un pueblo de secano, y, como hijo de agricultores, aprendí desde muy pequeño que la vida es muy dura, que hay que trabajar muchísimo y esforzarse para salir adelante. Aprendí a aceptar que la vida no es siempre de color de rosa y que todo el trabajo de un año puede perderse por falta de lluvia, por una mala tormenta, porque no te pagan un precio justo por tus cosechas, o, simplemente, porque no te pagan... En aquel duro entorno de trabajo, pero excepcionalmente dichoso en lo familiar y personal, aprendí que hay que ser honesto y solidario si quieres ser feliz en tu vida. Y allí, en mi pueblo, gracias a mi familia, amigos y a los maestros que tuve, empecé a amar el estudio y en especial las Matemáticas.

Por mi dedicación al estudio, a los nueve años me trasladé a Zaragoza a estudiar en el internado de los Padres Escolapios de la actual calle Conde Aranda. El cambio no fue nada fácil.

Recuerdo con cariño la vocación y profesionalidad de los padres escolapios y demás profesores para educarnos, así como la dura disciplina. Cada día asistíamos a una misa matinal y al rezo casi diario del rosario por la tarde. También recuerdo las interminables tardes y noches de estudio en las aulas, nuestras prácticas deportivas los jueves, sábados y domingos en el complejo deportivo que teníamos en el antiguo barrio de la Química, el ir a la Romareda para ver al equipo de los cinco Magníficos, así como las visitas a la Seo y al Pilar. Guardo un especial recuerdo de la amistad y complicidad que existía entre los compañeros del internado y que se ha mantenido con el transcurso del tiempo.

Durante los últimos cursos del bachillerato tenía mis dudas sobre estudiar Matemáticas o Medicina. El hecho de haber quedado finalista en las Olimpiadas Matemáticas contribuyó a descartar Medicina. De hecho, la primera vez que estuve en la Universidad de Zaragoza fue con ocasión de las pruebas de las Olimpiadas Matemáticas. La verdad es que el aula magna de la Facultad de Ciencias me impresionó muchísimo.

En el curso 1969-70, me matriculé en Ciencias en la Universidad de Zaragoza. El cambio desde el internado a la Universidad fue bastante duro. Sin embargo, las cosas me fueron muy bien. Recuerdo con cariño a algunos de mis profesores, como Mariano Tomeo Lacrué, Juan Sancho de San Román, Rafael Cid Palacios y, en especial, a José María Savirón de Cidón, *Pepe*, del que recuerdo aquel sábado que estábamos esperándole para realizar un examen de Física y él se olvidó. Luego lo encontramos paseando en el parque con su perro. Unos años después de acabar mi carrera, y siendo ya profesor de la Universidad Politécnica de Cataluña, tuve la oportunidad de compartir con él una conversación sobre la actividad que ya me apasionaba por entonces, el diseño de computadores paralelos.

Después de cursar el primer año en nuestra Universidad de Zaragoza, me trasladé a Madrid para estudiar Ingeniería de Telecomunicación en el curso 1970-71. Cuando terminé la carrera en el año 1974, marché a Barcelona a trabajar en la Escuela de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de

Catalunya. Desde entonces soy profesor y, desde 1983, catedrático en el Área de la Arquitectura de los Computadores.

Estos años de mi infancia y primera juventud vividos en la tierra, y rodeado del cariño de sus gentes, fueron más que suficientes para que me sintiera y me sienta siempre un aragonés de pura cepa. Quiero deciros, una vez más, que me siento muy orgulloso de ser aragonés y sobre todo, de haber nacido en Alfamén. Me considero «profeta en mi tierra». He recibido de Aragón y de los aragoneses, de vosotros, muchos más reconocimientos de los que realmente merezco. Conmigo habéis demostrado, una vez más, la gran generosidad de la gente de esta tierra. Siempre digo que son los reconocimientos de mi tierra los que me han dado más alegría: el Gobierno aragonés me otorgó el Premio Aragón, máxima distinción de la tierra; la Asociación Iniciativas para el Desarrollo de Aragón me concedió el premio especial de investigación; las casas regionales de Aragón en toda España me otorgaron en Borja la distinción de Científico Aragonés; en mi comarca me honraron con la Medalla de Platino como Aragonés Ilustre, con motivo de la celebración del 75 aniversario de la denominación de origen del vino de Cariñena. Y qué voy a deciros de ser Hijo Predilecto de mi pueblo, Alfamén, y de que la Asociación de Padres pusiera mi nombre a la única escuela del pueblo, que es donde estudié...

Estoy convencido de que en buena parte me otorgáis esta tan alta distinción por mi relación con la Universidad de Zaragoza. Ya he dicho que fui alumno de primer curso de carrera. Después, y ya estando en Barcelona, tuve mis primeros contactos con el profesor Manuel Silva, al que tuve la suerte de conocer anteriormente en Grenoble, donde él estaba acabando su tesis doctoral y a donde yo había ido para intentar avanzar en mis trabajos de tesis. Manolo me ayudó muchísimo allí y después fue una alegría para mí saber que se le contrataba en esta Universidad de Zaragoza.

Desde hace más de veinte años tengo la suerte de colaborar con profesores y alumnos de esta Universidad. A finales de los ochenta, y a iniciativa del profesor Silva, empiezo a ser invitado a dar conferencias y a impartir cursos de doctorado en esta

Universidad de Zaragoza. A lo largo de los 90, los estudios de Ingeniería de Telecomunicación e Informática, en el Centro Politécnico Superior, comienzan a consolidarse. Se empiezan a formar grupos de investigación en algunos temas de informática. Y es entonces cuando empezamos a establecer colaboración entre el grupo gaZ (Grupo de Arquitectura de Computadores de la Universidad de Zaragoza), liderado por el profesor Víctor Viñals, quien había realizado su doctorado en nuestro grupo en Barcelona y en mi Departamento de Arquitectura de Computadores de la Universitat Politècnica de Catalunya. Esta colaboración me ha permitido visitar la Universidad de Zaragoza en muchísimas ocasiones para dar clases, conferencias, seminarios, cursos de doctorado, para colaborar con profesores como Pablo Ibáñez y para codirigir las tesis de los profesores Teresa Monreal y Jesús Alastruey.

## **Arquitectura de computadores y supercomputadores**

Desde hace treinta años estamos realizando investigación en el campo de la arquitectura de los computadores. Nos dedicamos a dar ideas para diseñar los futuros computadores, desde los que incorporan los teléfonos móviles hasta los que se usan en los computadores personales y en los supercomputadores. La arquitectura de los computadores es en cada momento un compromiso entre las necesidades de las aplicaciones de los usuarios y las prestaciones y limitaciones de la tecnología a nuestro alcance.

Los humanos siempre hemos estado interesados en diseñar máquinas con el objetivo de que nos ayudaran a realizar cálculos. Durante siglos, la forma de representar la información fue el sistema de numeración decimal, y la tecnología para construir computadores, la de las ruedas dentadas. Ni una ni otra eran las más idóneas para producir máquinas adecuadas.

Los computadores actuales empiezan a ser posibles a partir de la simultaneidad de los siguientes hechos: el álgebra de Boole, la invención de los tubos catódicos y luego del transis-

tor, las aportaciones de Claude Shannon y todas las experiencias anteriores en el diseño de máquinas mecánicas, tales como la «máquina analítica» de Charles Babbage.

George Boole, coetáneo de Charles Babbage, propuso el álgebra de Boole entre los años 1847 y 1854. Esas nuevas matemáticas permitían representar y manipular expresiones lógicas usando las reglas derivadas de su álgebra. Es impresionante el hecho de que Boole, sin tener estudios universitarios, fuera capaz de proponer las bases matemáticas para los computadores actuales. Es interesante resaltar que el álgebra de Boole fue prácticamente olvidada durante muchos años: solo algunos estudiantes de filosofía le supieron ver alguna aplicación teórica.

La tecnología de ruedas dentadas no era la más apropiada para poder construir computadores útiles, ni la máquina de vapor para generar la energía necesaria para mover las ruedas. El cambio tecnológico adecuado se produce cuando, a partir del diseño de las bombillas incandescentes en 1878, el americano Thomas Alva Edison descubre el efecto Edison en 1883, que permitió al británico John Ambrose Fleming inventar el diodo de vacío en el año 1900. En 1906 el americano Lee de Forest introduce un tercer electrodo en el diodo y nace el triodo, como dispositivo que permite amplificar señales y también conmutar entre dos estados estables que podían representar los valores binarios de 0 y 1.

En el año 1938 el americano Claude Shannon escribió un artículo resumen de su tesis de máster en el MIT (Massachusetts Institute of Technology). En dicho artículo, Shannon demuestra que los conceptos lógicos de verdadero y falso que aparecen en el álgebra de Boole pueden ser representados con los dos estados de los triodos. Conecta el álgebra de Boole con los circuitos lógicos de dos estados, demostrando que estos circuitos, debidamente interconectados, pueden implementar las expresiones lógicas del álgebra de Boole. Claude Shannon, padre de la teoría de la información en comunicaciones, fue el primero en asociar los conceptos de la lógica binaria del álgebra de Boole con los circuitos de conmutación de las primeras centrales telefónicas. Fue la primera persona que supo ver cla-

ramente que la informática y las comunicaciones son parte de la misma cosa, y esa visión amplia permitió un gran avance en el diseño de los computadores y de los circuitos de comunicaciones. Fue un paso de tal calibre que muchos coinciden en señalar la tesina de Shannon, como la más importante del siglo xx en el campo de las tecnologías de la información.

El día 17 de noviembre de 1947, los laboratorios de la Bell anunciaron la fabricación de un dispositivo que se denominó *transistor*, que permite amplificar señales eléctricas, o mantener en su salida dos valores de tensión diferentes, característica idónea para trabajar con la lógica binaria. Puede realizar las mismas funciones que realizaban las válvulas de vacío, pero son mucho más pequeños y rápidos, permiten ser integrados en chips, consumen poca potencia y son más fiables. El *transistor* inició la verdadera revolución en el diseño de los computadores. Sus inventores, John Bardeen, Walter Brattain y William Schocley, recibieron, por ello, el Premio Nobel de Física del año 1956. Por cierto, el anuncio de este dispositivo no mereció ni un triste comentario en los periódicos de aquella época.

Aunque la empresa Bell empezó a comercializarlos el año 1948, lo cierto es que no fueron muy utilizados al principio. La fabricación no era sencilla, eran muy caros y poco fiables. En 1960 se empiezan a fabricar los primeros transistores de efecto de campo, que les dan una nueva e importante dimensión, y en el año 1963 se inventan los transistores CMOS, que constituyen la tecnología base de los computadores actuales.

El transistor se usó inmediatamente en las telecomunicaciones y pasó muy rápidamente a sustituir a las válvulas de vacío en el diseño de los computadores. El primer computador totalmente transistorizado es realizado por la propia Bell en el año 1954. Se le denominó TRADIC (TRANsistorized DIGital Computer), y estaba construido con 800 transistores de contacto, y 10000 rectificadores de germanio.

Hay un acuerdo total en reconocer el transistor como el dispositivo básico que ha hecho posible el rápido desarrollo de las tecnologías de la información. Para muchos de nosotros, es el invento tecnológico más importante de los últimos años. Con-

viene recordar aquí que unos pocos años más tarde, en 1953, Watson y Crick presentaron la estructura del DNA, por lo cual recibieron el Premio Nobel de Medicina en 1962. Ambos descubrimientos han tenido una influencia enorme en nuestras vidas.

Al invento del transistor le siguió el no menos importante de los circuitos integrados. El tamaño de los transistores era mucho más pequeño que el de las válvulas. Sin embargo, los condensadores y resistencias, tan necesarios en los circuitos como los transistores, ocupaban un tamaño muy considerable. En el año 1958, y de manera independiente, dos investigadores llegan a la conclusión de que casi todos los componentes que se necesitan en un circuito electrónico pueden ser construidos con el mismo material y ser miniaturizados. Aparece así el concepto de *circuito integrado*. Los inventores fueron Jack Kilby, de Texas Instruments, que presenta los primeros resultados el 12 de septiembre de 1957, patentando la idea el 6 de febrero del 1958, y Robert Noyce, que, trabajando en la recién creada Fairchild, patenta una idea similar en enero de 1959. Ambas empresas acordaron compartir la patente. Fue Jack Kilby el que también diseñó la primera calculadora portátil en 1967, como un ejemplo de aplicación práctica de los circuitos integrados. Pesaba 25 kilos y costaba 2500 dólares. Por cierto, Jack no fue admitido a estudiar en el MIT por tener notas muy bajas en Matemáticas, pero obtuvo el Premio Nobel de Física en 2000 por su invento del circuito integrado.

Desde el primer circuito integrado del año 1958, la capacidad de miniaturización de los transistores ha ido creciendo a una velocidad que fue predicha en 1965 por Gordon Moore, cofundador de Intel. Los tecnólogos han logrado, desde la aparición del transistor, reducir su tamaño a la mitad cada menos de dos años. Debido a esta llamada *Ley de Moore*, hoy en día somos capaces de integrar en circuitos basados en la tecnología del silicio, es decir, usando la arena de las playas, miles de millones de transistores en una superficie inferior a  $6 \text{ cm}^2$ . Eso quiere decir que en el espacio ocupado por cada uno de los 2300 transistores que tenía el primer microprocesador de Intel

en el año 1971 se integran ahora, unos pocos centenares de miles de transistores. Esa reducción lleva asociados un aumento en la velocidad de conmutación y una reducción en la energía consumida, características que han hecho posible esta revolución en el diseño de los computadores.

Durante muchos años, los arquitectos de computadores hemos estado investigando para intentar aprovechar estos avances de la tecnología y construir procesadores cada vez más rápidos y eficientes. La sinergia entre los avances tecnológicos, las ideas de los arquitectos y los avances en compiladores y diseño de sistemas operativos han permitido diseñar procesadores cuya velocidad se ha más que duplicado cada vez que el tamaño de los transistores se reducía a la mitad. Eso se ha traducido en el hecho de que, por ejemplo, la velocidad de los procesadores que llevan hoy uno solo de nuestros teléfonos móviles sea mayor que la velocidad de todos los procesadores que había en la Tierra cuando fuimos capaces de ir a la Luna hace ya más de cuarenta años. Entonces, cada uno de ellos ocupaba centenares de metros cuadrados y consumía miles de vatios. Este detalle refleja la gran evolución que ha experimentado la tecnología electrónica en las últimas décadas.

En el año 1913, Henry Ford comienza a fabricar sus coches Ford-T usando la idea de la *cadena de montaje*. Hasta entonces, los coches se empezaban a fabricar y se terminaban en un mismo sitio; es decir, eran los obreros especializados los que se movían a los coches para realizar sus trabajos, y además cada obrero realizaba muchas tareas diferentes, por lo que se encarecía el coste de la fabricación al tener que contratar obreros multiespecializados. Ford toma las ideas teóricas y de uso más general de Frederick W. Taylor sobre *organización científica del trabajo* y una de sus aplicaciones prácticas usada en el matadero de Detroit e introduce la idea de la *cadena de montaje*. La idea básica consiste en dividir la fabricación de los coches en  $n$  trabajos o tareas, de forma que se establece una cadena de montaje con  $n$  posiciones o etapas. Los chasis de los coches se mueven desde la primera posición, que es donde se empieza a fabricar el coche, hasta la última posición, que es donde se

acaba de montar el coche. Conforme van pasando por las etapas de la cadena de montaje, se van añadiendo piezas al coche. Así pues, se pueden estar construyendo  $n$  coches a la vez. Esta forma de fabricar los coches redujo el precio de fabricación porque se aumentaba la velocidad de fabricación de los coches y, además, los obreros se especializaban solamente en las tareas asociadas a cada posición de la cadena. Respecto al aumento de velocidad en la fabricación, tengamos en cuenta que, si se ajusta la cadena para que el tiempo necesario para realizar las tareas en cada posición sea el mismo, se pueden fabricar los coches a una velocidad  $n$  veces superior a la que se consigue cuando el coche no se mueve en su fabricación. Realmente, esta idea abarató el coste de los coches y revolucionó el mercado en Estados Unidos y en el mundo entero.

De manera análoga, los primeros procesadores se diseñaban de forma que el hardware estaba en cada momento ejecutando una sola instrucción del lenguaje máquina del procesador. Conforme el tamaño de los transistores se fue haciendo más pequeño, se empezaron a diseñar los procesadores siguiendo la idea de las *cadena de montaje* de Henry Ford. Así pues, el hardware del procesador se estructuró en  $n$  etapas especializadas, de forma que las instrucciones van pasando por las etapas hasta que se ejecutan. De igual manera que en el caso de las cadenas de montaje de los coches, se necesita que el tiempo de procesado de cada etapa sea el mismo. Indudablemente, la disminución en el tamaño de los transistores junto con el aumento asociado de su velocidad de conmutación ha hecho posible aumentar el número  $n$  de etapas balanceadas que tienen los procesadores así como incrementar la velocidad para ejecutar el trabajo asignado a cada etapa. El tiempo de ciclo de un procesador es la velocidad a la cual se puede ejecutar el trabajo asignado a cada etapa y pasar los resultados parciales a la etapa siguiente. En nuestros días, es normal tener procesadores con entre 10 y 20 etapas, procesando entre 4 y 6 instrucciones en cada etapa es decir, cada etapa puede contribuir en cada ciclo a la ejecución de ese número de instrucciones, y trabajando a una velocidad superior a unos pocos giga-

hercios. Como ejemplo concreto, un procesador con un ciclo de reloj de un gigahercio y con hardware cuyas etapas pueden estar operando sobre cuatro instrucciones a la vez, es capaz, en teoría, de ejecutar 4000 millones de instrucciones por segundo. Estos resultados son realmente impresionantes.

No es fácil optimizar la eficiencia de una *cadena de montaje* de coches, pero aún es más difícil optimizar el equivalente en el diseño de procesadores. En la construcción de coches, solo hace falta que el material a añadir en el coche en cada fase o etapa de la cadena esté allí cuando llega el siguiente coche y que el tiempo requerido para añadirlo al coche sea el mismo en cada etapa. Los robots actuales se encargan de hacer muy bien este trabajo. Es importante resaltar aquí el hecho de que el diseño de cada coche es casi independiente de todos los demás. Por este motivo, la cadena puede funcionar a una velocidad casi constante y sin frenazos, es decir, es fácil predecir el número de coches que se fabricarán por unidad de tiempo.

En el caso de las instrucciones de un programa, existen dependencias entre ellas en que hacen muy difícil la optimización del diseño del procesador para aumentar la velocidad de ejecución de los procesadores. Existen dos tipos de dependencias: a nivel de datos y del control. Muchas de las instrucciones de los programas producen resultados que serán empleados por instrucciones posteriores. Cuando esta situación muy frecuente se da, decimos que existe una dependencia de datos entre la instrucción que produce el resultado y las instrucción(es) posterior(es) que lo usa(n). Por otra parte, también existen instrucciones de salto, cuyos resultados controlan o deciden cuál debe de ser la siguiente instrucción a ejecutar en el programa. Ambas situaciones, cuyas equivalentes no se dan en las cadenas de montaje de coches, constituyen frenos imprevisibles en la ejecución de las instrucciones.

Un ejemplo clásico de dependencia de datos aparece cuando una instrucción ha de ir a la memoria para traer un dato al procesador y la siguiente instrucción lo usa. Pues bien, el acceso a memoria puede durar unos pocos cientos de ciclos de procesador. ¿Hemos de parar la ejecución de las instrucciones a

partir de la que necesita el dato hasta que se haga el acceso a memoria? Suponer además el caso en el que el dato que ha de venir de memoria es uno de los operandos de una instrucción de salto, por lo que esta instrucción no se ejecutará hasta dentro de muchos ciclos y hasta que no lo hagamos el procesador no sabe cuál será la instrucción siguiente a ejecutar. ¿Hemos de parar el procesador de nuevo hasta que podamos ejecutar esta instrucción? Estos hechos pueden degradar muchísimo la eficiencia en la ejecución de las instrucciones. Para intentar que el procesador funcione a la máxima velocidad que le permite el hardware de su diseño, los arquitectos de computadores hemos propuesto y optimizado diversas técnicas, tales como *ejecución fuera de orden*, *predictores de saltos* y *memorias cache*.

Desde hace tiempo, los procesadores son capaces de ejecutar las instrucciones *fuera de orden*. Es decir, ante una dependencia de datos, el procesador intenta seguir ejecutando las instrucciones que no dependen de la que produce la dependencia, de forma que las que dependen de esta instrucción se ejecutarán cuando se resuelva la dependencia. De la misma forma, el procesador tiene un hardware especializado, denominado *predictor de saltos* que le ayuda a predecir el resultado de las instrucciones de salto, de manera que decide continuar por una rama del programa sin saber si será la correcta. Lógicamente, esta ejecución *fuera de orden* debe garantizar que el resultado final del programa es el correcto, es decir, idéntico al que hubiéramos obtenido si la ejecución de las instrucciones hubiera sido *en orden*. Para ello y en el caso de los saltos, cuando se ejecuta la instrucción de salto más antigua, el hardware comprueba que el resultado de la ejecución es el mismo que la predicción que se hizo. En caso contrario, el procesador debe volver a ejecutar el programa a partir de esta instrucción de salto mal predicho, con el consiguiente deterioro de la eficiencia del procesador y con el despilfarro de energía asociado a estas instrucciones ejecutadas por el camino incorrecto. En algunos programas muy utilizados existe una instrucción de salto cada más o menos cinco instrucciones del lenguaje máquina. Por otra parte y debido al problema de los accesos a

memoria, los procesadores pueden estar ejecutando, sin haber acabado totalmente, hasta unos pocos centenares de instrucciones. Esto quiere decir que el procesador puede tener en cada momento unas decenas de instrucciones de salto que han sido predichas y muchas de ellas no ejecutadas.

La tecnología ha permitido diseñar procesadores cada vez más rápidos, de forma que la frecuencia del reloj de los procesadores ha aumentado alrededor de un 60% por año. Sin embargo, solo ha permitido reducir el tiempo de acceso a las memorias alrededor de un 7% anual. Tal como dijimos anteriormente, un acceso a memoria principal requiere un tiempo equivalente a varios centenares de ciclo del procesador. Para reducir el tiempo que el procesador necesita para acceder a los datos y a las instrucciones en memoria, se inventó el concepto de *memoria cache*. La *memoria cache* es una memoria más pequeña que la memoria principal, pero mucho más rápida que ella, y que se coloca entre la memoria central y el procesador de forma que existen mecanismos software y hardware automáticos que intentan que la *memoria cache* tenga en cada momento aquella información que el procesador va a necesitar en los ciclos siguientes de forma que así pueda servir la mayoría de los accesos que un procesador necesita con la memoria principal. La *memoria cache* contiene una copia de un subconjunto de la memoria principal. Y ese contenido se adapta dinámicamente en función de la localidad y características de los programas. Algunos mecanismos de renovación de contenidos también se basan en técnicas sofisticadas de *prebúsqueda* de datos e instrucciones desde la memoria principal a los diferentes niveles de *memoria cache*.

Los procesadores pueden ejecutar las instrucciones *fuera de orden* pero la validación de las instrucciones ha de ser *en orden*. Este hecho garantiza que los resultados del programa sean siempre correctos. Si no fuera así, podría ocurrir que una instrucción que almacena un resultado en memoria posterior a la de un salto que hubiera sido mal predicho, escribiera el resultado en memoria dando lugar a resultados incorrectos del programa.

A pesar de esta ejecución *fuera de orden*, de la optimización de la jerarquía de memoria con *memorias cache* cada vez más eficientes y de tener *predictores de salto* que aciertan casi siempre cuando se ejecutan programas numéricos y mas del 96 % de las veces cuando se ejecutan el resto de los programas, las dependencias entre instrucciones y el gran coste en el acceso a memoria hace que los procesadores sean muchas veces máquinas muy rápidas, pero muy ineficientes. Es bastante normal que un procesador cuyo hardware está preparado para ejecutar hasta cuatro instrucciones por ciclo tenga una eficiencia menor del 5% cuando ejecuta programas que operan sobre grandes bases de datos.

Nuestro grupo de investigación ha contribuido durante los últimos 25 años a proponer técnicas para mejorar el diseño de las *memorias cache*, para mejorar los mecanismos de *prebúsqueda*, para mejorar la eficacia de los *predictores de salto* y para hacer posible el diseño del procesador en un número mayor de etapas balanceadas y así poder disminuir el tiempo de ciclo del procesador. Por otra parte, hemos propuesto mecanismos novedosos que, asociados a varias etapas del procesador, aumentan la velocidad en la ejecución de las instrucciones y reducen el gasto energético. Algunas de estas técnicas han sido desarrolladas conjuntamente por el Grupo de Arquitectura de Computadores de la Universidad de Zaragoza, gaZ, mediante la codirección de tesis doctorales. Por otra parte, hemos realizado contribuciones pioneras en el diseño de *procesadores vectoriales*, que, aunque originalmente se pensaron y utilizaron para ejecutar aplicaciones numéricas, hoy en día se han incorporado, por la necesidad imperiosa de reducción de consumo energético, en casi todos tipos de procesadores actuales.

Desde hace un poco menos de diez años, hemos llegado casi al límite en la velocidad de los procesadores. Por una parte, el aumentar más la frecuencia de reloj hace que la energía eléctrica consumida sea mayor. El trabajo de esa enorme cantidad de transistores trabajando a frecuencias elevadas hace que se produzca un calor que hemos de sacar de los chips, ya que en caso contrario se queman. Hay chips que en menos de

6 cm<sup>2</sup> consumen casi 200 vatios, y esto es demasiado, no sólo por el coste de la energía, sino porque hemos de usar técnicas sofisticadas y caras para eliminar el calor de estos circuitos. Tengamos en cuenta que esa densidad de potencia es la mitad de la que existe en las barras de una central nuclear. Por otra parte y tal como hemos comentado anteriormente, la tecnología no nos ha permitido reducir el tiempo de acceso a la memoria a la misma velocidad a la que nos ha permitido aumentar la velocidad del procesador, por lo que se ha agravado el problema del acceso a los datos e instrucciones de la memoria. Somos capaces de diseñar procesadores que pueden ejecutar, teóricamente, muchísimas instrucciones por unidad de tiempo, pero la memoria no nos permite el suministro de instrucciones y datos a la velocidad necesaria. Por otra parte, el aumentar el número de etapas del procesador hace que cada fallo del predictor de saltos haga más ineficiente al procesador. Por ello, durante los últimos años esa disminución en el tamaño de los transistores no la podemos seguir convirtiendo en el diseño de procesadores más rápidos, y lo que hacemos es poner más de un procesador dentro de un chip, dando lugar a los chips multiprocesador o *multicore*.

La tecnología todavía permitirá que en el espacio que ocupa ahora un transistor se puedan integrar unas pocas decenas. En ese momento, antes de veinte años probablemente, los transistores solo contendrán unos pocos átomos de silicio y nos encontraremos con problemas de muchos tipos, técnicos y económicos, para poder seguir reduciendo más su tamaño. Habremos llegado al límite de la tecnología del silicio. A partir de ahora, y hasta que llegue ese momento, veremos aumentar el número de procesadores de los chips hasta llegar a tener varios centenares de procesadores dependiendo de la complejidad de cada procesador. La velocidad acumulada de los chips es la suma de las velocidades de los procesadores que contiene, pero ahora estaremos forzados a hacer que todos ellos trabajen y colaboren en la ejecución de un mismo programa para que este pueda experimentar un aumento de velocidad proporcional al incremento en el número de procesadores. Es decir, se

ha acabado el tiempo en el que, esperando una nueva generación de procesadores, garantizábamos que los programas secuenciales se iban a ejecutar mucho más rápido. Para lograr un aumento en la velocidad de ejecución, hemos de programar y ejecutar los programas en paralelo.

Pero no es la primera vez que nos enfrentamos con el problema de hacer que varios procesadores colaboren en la ejecución del mismo programa. Desde hace más de treinta años, estamos diseñando y usando sistemas computacionales donde varios procesadores trabajan conjuntamente en la ejecución de un mismo programa. Son máquinas paralelas, y a las más rápidas se las denomina *supercomputadores*. Los supercomputadores son los computadores más rápidos del momento. Son la «Fórmula 1» de los computadores. Su diseño y programación constituyen un reto tecnológico. Los supercomputadores son herramientas que nos ayudan a enfrentarnos a problemas muy complicados que de otra forma sería muy difícil resolverlo. Son como microscopios que nos permiten ver sistemas antes de haberlos construido o que nos permiten verlos cada vez con una mayor realidad y precisión. Sus impresionantes velocidades de cálculo y sus enormes memorias hacen de estas máquinas la herramienta ideal para que los expertos de la mayoría de las ciencias e ingenierías puedan ejecutar los modelos que representan el fenómeno que están estudiando. A su vez, los resultados del computador hacen que los modelos sean mejorados. Es decir, los supercomputadores son amplificadores de la investigación básica, de las teorías que explican el comportamiento de los fenómenos a estudiar. Los supercomputadores y, más en general, los computadores de altas prestaciones están siendo fundamentales para hacer avanzar la ciencia y la Ingeniería de forma similar al papel que representaron las Matemáticas como soporte básico al desarrollo de la Física durante los dos siglos anteriores al actual.

Hoy en día, hay supercomputadores que tienen varios cientos de miles de procesadores, con unas velocidades superiores al petaflop, es decir,  $10^{15}$  operaciones por segundo, y estamos diseñando para dentro de diez años supercomputadores que

serán más de 1000 veces más potentes que los actuales, superando la barrera del exaflops, es decir,  $10^{18}$  operaciones por segundo, y que contendrán varios millones de procesadores que trabajarán conjuntamente en paralelo. La velocidad de estos supercomputadores se ha multiplicado por 1000 cada diez años, de manera que en 1988, el supercomputador más rápido era capaz de superar la velocidad de  $10^9$  operaciones por segundo, es decir, 1 gigaflop; en 1998 la velocidad era de  $10^{12}$  operaciones por segundo, es decir, un teraflops, y en 2008 la velocidad es de  $10^{15}$  o un Petaflop. Tengamos en cuenta que hoy existen chips, con velocidades superiores al teraflops, es decir, superiores al supercomputador más rápido del mundo hace tan solo doce años. Y que dentro de cuatro años, existirán chips con velocidades superiores al 10 % de la velocidad que tuvo el supercomputador Marenostrium del BSC en el año 2004 y que lo convirtió en el número 4 del mundo y en el más rápido de Europa. Junto con estos chips potentísimos, también diseñaremos video consolas y pantallas gráficas, que, junto con los avances en la velocidad de las redes de comunicación y con la creciente capacidad para almacenar información binaria, nos harán recordar a algunos que tal vez nacimos demasiado pronto, aunque seguro que nos ayudarán a hacer más llevadera nuestra jubilación. Estas enormes potencias de cálculo estarán en los computadores personales, de forma que permitirán soñar a nuestros investigadores y ayudarán a desarrollar la ciencia y la ingeniería a niveles nunca vistos. Esos «locos cacharros» nos ayudarán a disponer de medicinas personalizadas, a diseñar medios de transporte más seguros y menos contaminantes, a aumentar la calidad de vida de las personas o a ejecutar modelos globales de la tierra que nos ayuden a protegerla contra las agresiones del hombre.

Para que estas supermáquinas puedan realmente servirnos para la finalidad para la que las construimos, necesitamos hacer programas que usen eficientemente las decenas de procesadores que tendrán nuestros teléfonos del futuro inmediato, los centenares de procesadores que contendrán los computadores personales y los millones de procesadores que

contendrán los supercomputadores del futuro. Para ello, necesitamos cambiar la educación que impartimos a nuestros jóvenes estudiantes. Necesitamos continuar enseñando la mejor Informática, para que la sociedad pueda seguir beneficiándose de los futuros grandes avances en la materia y lograr así que las generaciones que vienen puedan soñar, haciendo mejor ciencia y por tanto, puedan ser más felices. La informática es una ingeniería muy social. Necesitamos formar a los alumnos de carrera y a nuestros estudiantes de doctorado en nuevas disciplinas, tales como algoritmos en paralelo y lenguajes de programación que permitan expresar este paralelismo. A nivel de investigación necesitamos crear equipos multidisciplinares que sean capaces de crear ese software que nos permitirá soñar en nuestras actividades del día a día, ocio e investigación. Necesitamos que los profesionales en computación se eduquen y colaboren junto con ingenieros, científicos, economistas, biólogos... en un ecosistema apropiado que fomente el intercambio libre de las ideas y de los conocimientos.

Nuestro grupo de investigación fue pionero en el diseño y la programación de estos computadores paralelos. Comenzamos hace más de veinticinco años, justo casi cuando empezaban estas tecnologías, y hemos realizado contribuciones muy importantes en el diseño de varios aspectos del hardware, como son los procesadores, la jerarquía de memoria y las redes de interconexión y en el desarrollo de sistemas operativos, compiladores, modelos de programación, herramientas de evaluación y aplicaciones paralelas. He de decir que en materia de computadores paralelos tenemos una tradición en colaborar con el BIFI de la Universidad de Zaragoza a través de la Red Española de Supercomputación, que depende del Centro Nacional de Supercomputación que dirijo.

## **Investigar, ¿para qué?**

La investigación es uno de los motores más importantes que tiene un país para ser competitivo y producir riqueza. Sin inves-

tigación no hay ideas, sin ideas no hay empresas competitivas, sin empresas competitivas un país no produce riqueza y sin riqueza no hay bienestar social. Un país necesita producir riqueza para poder asegurar a sus ciudadanos, en todo momento, una educación de calidad, como garantía básica para una igualdad de oportunidades, una buena sanidad y una amplia cobertura social.

Para generar buenas ideas, se necesita tener un ecosistema del conocimiento adecuado. Un país moderno ha de generar ese entorno idóneo para que algunos de sus ciudadanos tengan las condiciones necesarias para crear esas ideas. Y para que exista ese caldo de cultivo rico en oportunidades, es imprescindible que las Administraciones, las empresas, las universidades y los centros de investigación vayamos en la misma dirección y a velocidades adecuadas; que sumemos y no restemos. Basta con que alguno de estos actores falle para que el resultado final no sea satisfactorio.

En definitiva, se cumple aquello de que: «no son los países más ricos los que dedican más dinero a la investigación, sino que aquellos países que dedicaron más dinero a la investigación son ahora los países más ricos».<sup>1</sup> La investigación es una apuesta clara de futuro para los países más avanzados.

Durante mucho tiempo se ha querido diferenciar, y casi contraponer, la investigación básica o fundamental de la investigación aplicada. Creemos que una característica fundamental de toda buena investigación es que permita ser aplicada para mejorar el nivel de bienestar social de la humanidad. La verdadera separación entre los diferentes tipos de la actividad investigadora debería ser entre buena y mala investigación. La buena investigación es la que produce riqueza y bienestar social al entorno donde se realiza.

---

1 El flujo de inversión en I&D significa el 2,6 % del PIB en Estados Unidos y, el 1,7 % en Canadá. Los Gobiernos de estos países aportan un tercio. En Corea del Sur representa el 2,7 %, con participación estatal de un quinto.

Si se busca un resultado a corto plazo para mejorar un producto ya existente, nos estamos refiriendo a la innovación tecnológica. Por otro lado, si estamos buscando nuevas cosas de las que conocemos apenas nada, diremos que estamos haciendo una investigación más fundamental, más especulativa en sus fines, pero que, si tenemos éxito, sus resultados podrán tener un mayor impacto. Entre estos dos extremos, existe una investigación orientada a mejorar aplicaciones ya conocidas; a veces, en este campo intermedio, los resultados cuestan muchísimo de obtener. Por otra parte, es aquí donde se plantea una competencia feroz entre las empresas, y donde la investigación puede ser más productiva. En nuestro campo de investigación, la arquitectura de computadores y la supercomputación, este sería el caso de considerar la investigación orientada a diseñar los microprocesadores y supercomputadores que habrá dentro de quince años.

En España, tradicionalmente, no hemos sabido crear ese ecosistema que una buena investigación necesita. A nivel de investigación, hemos sido, y continuamos siendo, un desierto, donde, de vez en cuando, aparecen algunos brotes verdes, producto del ingenio de brillantes investigadores individuales y de acciones aisladas de nuestras Administraciones y empresas. Un ejemplo claro es nuestro premio Nobel don Santiago Ramón y Cajal. Tampoco se ha sabido promover la necesaria colaboración empresa-centros de investigación para transferir y aplicar esas ideas que permitirían mejorar la competitividad de un país.

Durante los últimos años, nuestras Administraciones han incrementado considerablemente los recursos para la investigación. Cataluña, por ejemplo, ha dedicado grandes recursos económicos para crear centros e institutos de investigación en los campos de las ciencias de la vida, de las telecomunicaciones, la fotónica, la física de altas energías, la supercomputación, etc. Todos ellos son competitivos a nivel internacional en cuanto al número y calidad de sus resultados científicos. Han atraído talento desde el extranjero y han colaborado con el tejido empresarial para producir riqueza. Son ejemplos claros

donde se puede ver que el dinero destinado por las Administraciones a ellos se multiplica por mucho debido a los proyectos europeos en los que participan y a sus colaboraciones con las empresas. Esos centros son generadores de ideas que producen riqueza para el país. Programas específicos como el *Santiago Ramón y Cajal* han permitido atraer a científicos del extranjero, que han contribuido a crear más espacios verdes en el desierto tradicional de nuestra ciencia.

En este punto y a nivel personal, permítanme decirles que en el Barcelona Supercomputing Center por cada euro que recibimos de las Administraciones públicas anualmente desde el año 2004 para investigar, hemos obtenido cuatro a través de los proyectos europeos y convenios con empresas líderes en el sector tales como IBM, Microsoft, Repsol o Iberdrola. Fuimos creados para tener un máximo de 60 personas trabajando y ahora somos más de 325 colaboradores, con 250 investigadores, de los que alrededor de 100 han venido de 28 países. Hemos logrado publicar en los mejores sitios y atraer riqueza y talento internacional. Formamos a personal altamente cualificado que hace a nuestras empresas más competitivas. Atraemos las empresas multinacionales a España para crear puestos de trabajo en nuestro país. Y como nosotros, hay varios centros en España en la misma línea de excelencia investigadora y de transferencia de tecnología al entorno productivo. En estos tiempos de crisis en los que casi todas las noticias son negativas respecto al enorme número de parados, y en cómo reducirlo, echo en falta un mensaje claro de esperanza a la sociedad civil, con ejemplos como estos centros de investigación modélicos a nivel mundial, y, sobre todo, echo en falta una clara apuesta de nuestros gobernantes a seguir apoyando estas iniciativas, que son ejemplos de cómo convertir el dinero invertido en mucho más dinero.

En los últimos años, en España se han dedicado bastantes recursos a la investigación y hemos sido capaces de empezar a crear en algunos temas, el ecosistema necesario del que hablamos. Hemos arado, sembrado y tenemos los campos en primavera, hemos empezado a plantar campos de árboles que nece-

sitan un cuidado de unos pocos años para que puedan producir un buen fruto... y necesitamos esa agua mínima para que la cosecha produzca sus mejores frutos..., para que el desierto se convierta en un espacio verde con gran cantidad de oasis científicos..., para cambiar esa situación histórica que en España se resume con la frase de Unamuno que nos ha hecho tanto daño: «Que inventen ellos».

Desde el exterior se pensaba que España estaba decidida a entrar en el club de países que creen que la investigación es un motor importante para producir riqueza. Sin embargo, con la llegada de la crisis económica global, hay serias dificultades para aumentar los recursos necesarios. Parece ser, una vez más, que la investigación no está en la lista de prioridades de nuestros políticos. Los presupuestos para la investigación han sufrido recortes, y esto es malo por muchas razones.

Somos conscientes de que el reparto de los presupuestos es un problema difícil de resolver y estamos de acuerdo con la idea de que la primera prioridad de un país es ayudar a los más necesitados. Pero también debemos decir que la buena investigación es un excelente método para convertir dinero en ideas útiles, que a su vez producen mucho más dinero al país, ya que ayudan a crear más puestos de trabajo. La buena investigación, con un proceso posterior de transferencia adecuado, es la forma más eficaz de creación de riqueza y de puestos de trabajo cualificados.

Creemos que es fundamental que nuestros parlamentos acuerden pactos para la ciencia. Los parlamentos deben llegar a acuerdos en temas básicos para los ciudadanos, como son la educación, seguridad, protección social e investigación. La dirección tomada por los países en estos temas no debería depender de los partidos que gobiernan en cada momento, sino que debería ser producto de un acuerdo mayoritario a largo plazo de los parlamentos. El pacto para la ciencia debe ser compartido por los empresarios<sup>2</sup> y debería ser un compro-

---

2 Ver la nota 1.

miso a largo plazo para dedicar los recursos económicos necesarios, para seleccionar los temas donde queremos ser líderes y para optimizar la gestión de los recursos.

Es muy importante para un Estado que las Administraciones creen en la investigación y que, por lo tanto, asignen los recursos adecuados. Y que no den marcha atrás en los recursos ni en tiempos de crisis. La investigación requiere continuidad y mirar a largo plazo. Nuestras Administraciones son conscientes de que estamos muy lejos de dedicar a la investigación los recursos que otros países dedican.<sup>3</sup> Nos gustaría insistir en los conceptos combinados de *cohesión social* (un término tradicionalmente de izquierdas) y *aumento de la productividad* (clásicamente de derechas). La investigación incide positivamente en ambos conceptos.

En una situación como la nuestra, de reciente crecimiento y con estructuras todavía muy frágiles, no se puede dar un frenazo a las inversiones, ya que se puede deshacer en muy poco tiempo lo alcanzado con esfuerzo y tenacidad durante los últimos años. También se puede producir un desánimo en los investigadores y empresas, que será difícil de superar. Se pueden perder generaciones de investigadores y se puede frenar la atracción de talento, que, acertadamente, se ha estado haciendo durante los últimos años, e incluso podría aumentar la tradicional fuga de talentos autóctonos.

España debe seguir los pasos que han dado Alemania, Estados Unidos y países del Este asiático en tiempos de crisis, aumentando los presupuestos para educación e investigación. Lo que ha hecho España *no es una forma inteligente de responder a la crisis financiera*, decía recientemente la revista *Nature*. Hace un par de años, la revista se deshacía en elogios hacia la políti-

---

3 En el año 2008 la OCEC reportó que España invirtió un 1,12%, muy por debajo del 1,5% recomendado para países en vías de desarrollo por la Organización de Naciones Unidas y muy lejos del 3,8% de Suecia. Dicha inversión debería aumentar del 1,9% al 3% del PIB de la UE para el 2010, y la parte financiada por el sector privado debería ser dos tercios del total.

ca científica del Gobierno central, diciendo que «los casos de excelencia científica muestran que España es capaz de entrar en una edad de plata científica». Solo un año más tarde, afirmaba que «España no debe utilizar la crisis económica como excusa para frenar los planes que mejoren la investigación». «España está regresando a la edad de bronce [...]», una edad de la que yo, personalmente, pienso que sería muy difícil salir.

Tan importante como dedicar recursos suficientes para investigar es disponer de mecanismos que los gestionen bien. Debe existir una estructura de gestión y control, formada por técnicos de alto nivel de preparación e independientes de los partidos políticos. Los cambios de Gobiernos y del personal dedicado a la gestión de los recursos para la investigación suelen ser muy negativos para esta. Se paralizan muchas acciones, se retrasan otras y se empiezan otras muchas sin un criterio muy razonado.

Es muy importante en países como el nuestro definir líneas de investigación prioritarias: no hay recursos suficientes para todo. No se puede aplicar una política de «café para todos». En España, en el tema de la supercomputación, podemos apostar entre tener un centro puntero a nivel mundial, o no tener ninguno. La competencia exterior es muy dura y lo que tenemos que hacer es colaborar internamente, aunar esfuerzos e invertir en excelencia. La Red Española de Supercomputación es un ejemplo claro de utilización óptima de los recursos caros de supercomputación y de colaboración entre los investigadores.

En tiempos de crisis, como ahora, es cuando más esfuerzo se ha de dedicar a formar expertos en tecnologías como las TIC, tecnologías de la información y de las comunicaciones, energías renovables o ciencias de la vida, que son las que nos ayudarán a salir antes y mejor de la crisis. Hemos de favorecer la formación de doctores, con un aumento de las becas, y dotarlas con una mayor dignidad en los sueldos y en su entorno social. Tengamos en cuenta que con el dinero pagado para fichar a algún futbolista estrella se podrían haber contratado 9000 estudiantes de doctorado durante un año, o que el coste

de las plantillas de los equipos del Barcelona C.F. y del Real Madrid que jugaron el 29 de noviembre de 2010 en el Camp Nou, estadio del Barcelona, es equivalente al coste anual de 100 000 estudiantes de doctorado, que también habrían llenado las gradas del estadio.

Las universidades y centros de investigación constituyen otro de los tres pilares o soportes de la investigación. Afortunadamente, la universidad ha avanzado muchísimo en todos los aspectos. Los recursos que la sociedad nos asigna van en aumento cada año, hay mucha más profesionalidad y dedicación por parte de todo el personal y la gestión de los recursos es eficiente. Pero debemos seguir avanzando en la excelencia docente e investigadora. Aún hay muchos aspectos que mejorar. Necesitamos cambios drásticos en nuestras universidades. En pocas palabras: creemos que es necesario refundar las universidades si las queremos convertir en centros de excelencia de la investigación.

Los docentes y, en general, las personas que trabajamos en las universidades y centros públicos de investigación somos personas privilegiadas. Los profesores, en particular, nos dedicamos a hacer lo que nos gusta y, además, tenemos nuestros lugares de trabajo protegidos hasta la jubilación.

La investigación en la Universidad debe ser la obligación básica del profesorado y su seña más clara de identidad, y hoy en día no lo es. «Suele suceder, además, que los mejores investigadores son, a su vez, los mejores profesores». Hay que cambiar la situación actual, para que los profesores que sean muy buenos investigadores puedan tener el tiempo y los recursos necesarios para desarrollar su labor investigadora. Necesitamos clarificar y prestigiar la carrera académica.

La Universidad ha de formar a buenos profesionales y, entre ellos, buenos investigadores. Y esta tarea empieza en los colegios. Hemos de formar a los alumnos en el esfuerzo continuado, la tenacidad, capacidad de sacrificio, disciplina, compromiso, ética y en el amor propio, que son los ingredientes para avanzar, cualidades que han de tener también los investigadores. El tipo de enseñanza recibida desde niños influye en

la creatividad y en la emprendeduría. Es necesario incentivar la curiosidad, el atrevimiento, la crítica constructiva, la iniciativa y el asumir riesgos y responsabilidades.

Necesitamos refundar la universidad para basarla en parámetros de *calidad y excelencia* que le permitan cumplir con su misión, que no es otra que la de crear, transmitir y transferir conocimiento a la sociedad. La *mediocridad* y la *meritocracia* no son compatibles con una universidad moderna y social, y parte de esa refundación pasa, por ejemplo, por cambiar sus estructuras de gobierno, por dar prestigio a la investigación, docencia y gestión y por realizar una evaluación permanente de todos sus trabajadores.

Necesitamos una evaluación objetiva de la actividad universitaria realizada por expertos externos. La existencia de personal con rango de funcionario del Estado da estabilidad en el puesto de trabajo, pero no debería suponer impunidad para no realizar un trabajo continuo de calidad. Ambos conceptos: ser funcionario y ser eficientes son compatibles y deben ser exigibles.

Es una responsabilidad de los profesores universitarios el realizar investigación de calidad y generar ideas que se transfieran a las empresas. Necesitamos potenciar la relación empresa-universidad, permitir de manera fácil que los profesores universitarios puedan realizar estancias en las empresas y promover que las empresas contraten a nuestros licenciados y doctores. Pensamos que las universidades deben ser financiadas en función no solo del número de alumnos que tienen, sino, además, y sobre todo, en función de la excelencia de sus investigadores.

Debemos buscar la excelencia y la internacionalización. Vivimos en un contexto global y nuestro reto es el mundo. No nos miremos el ombligo. Debemos crear programas de master y de doctorado de alta calidad para atraer a los mejores alumnos del mundo. Debemos establecer colaboración con otros centros extranjeros de prestigio.

Decíamos que la buena investigación debe ser capaz de convertir el dinero en ideas y conocimiento. Tan importante como eso es hacer el recorrido inverso: «las buenas ideas, el conocimiento, deben convertirse en dinero», y este camino inverso

no es responsabilidad directa de la investigación, sino, entre otros, de la transferencia de la tecnología, de la valoración de la propiedad intelectual, de la creación e incubación de empresas, del aporte de fondos de capital riesgo al sistema y de la colaboración entre investigadores y empresas. En este último tema, en nuestras universidades no andamos muy bien.<sup>4</sup>

Los productos generados por la investigación son los artículos y patentes, la formación de investigadores y la transferencia de resultados al sector productivo. Los artículos publicados en prestigiosas revistas y congresos son un exponente claro de la buena investigación. A su vez, es el producto más fácil de evaluar. De todos es conocida la importancia y dificultad de publicar en sitios donde la competencia y nivel científico son muy altos. Muchas veces, son estos artículos los que permiten obtener reconocimiento a nuestra labor y mejorar nuestros puestos de trabajo. Es muy importante el número de citas que hacen nuestros colegas a nuestros trabajos publicados.

El producto más importante de la investigación es formar nuevos investigadores y tecnólogos que permiten generar un acceso rápido a nuevas tecnologías disponibles y fuentes de conocimiento aplicado que generen alto impacto en los sectores productivos. Las empresas deberían ser las receptoras directas del mayor número posible de tecnólogos especializados y de doctores.

Las patentes constituyen otra medida indirecta de la calidad de la investigación. En algunos campos, las patentes pueden ser más importantes que las publicaciones en revistas o congresos de alta calidad. Las patentes en uso suelen dar una medida clara del nivel de transferencia de la investigación al sistema productivo. Así, es razonable admitir que el objetivo de los investigadores del famoso centro de investigación de IBM, el Watson, sea el de patentar sus ideas, más que el de publicarlas en una revista.

---

4 En España, solo el 39% del personal docente investigador participa en proyectos y convenios con empresas.

Las estadísticas en nuestro país indican que en algunos campos, la relación de artículos por investigador es tan buena como en los países más avanzados. Sin embargo, no ocurre igual con el número de patentes. Y esto es así porque no tenemos un entorno industrial que esté estimulando o potenciando la investigación en la universidad, ni tan siquiera esté esperando o sea capaz de patentar las ideas generadas por la universidad o centros de investigación. La investigación universitaria debe generar nuevas empresas basadas en resultados de alta tecnología y motivar a las empresas ya existentes a usar sus resultados. En los países más avanzados, las empresas financian un alto porcentaje de la investigación, reciben las ideas generadas y contratan los nuevos doctores.

La colaboración en la investigación a medio y largo plazo entre las empresas y los investigadores es muy baja en nuestro país. Muchas son las razones que nos colocan en esta situación. La primera es que no existe mucha tradición investigadora en nuestras empresas. Una medida indirecta de lo anterior es ver el reducido número de doctores que hacen investigación en las empresas. Números recientes indican que en España menos del 20 % de los doctores trabajan en las empresas, y no todos ellos haciendo labores de investigación. Este porcentaje es del 80 % en los Estados Unidos, y superior al 50 % en los países más avanzados de la Unión Europea. Hay que considerar la *fuga de cerebros*, que no sólo afecta a España. Hay estadísticas que indican que más de 300 000 doctores europeos desarrollan sus actividades de investigación en los Estados Unidos, sin duda porque allí tienen más y mejores medios, gozan de un entorno ideal para la investigación y están mejor considerados económica y socialmente. Además, de acuerdo con un estudio de COTEC,<sup>5</sup> se dan en España dos circunstancias que no favorecen el aprovechamiento de la capacidad científica y tecnológica del sistema público de I+D. Son el escaso conocimiento empresarial de la capacidad científica y la falta de incentivos en el sistema públi-

---

5 Fundación para la innovación tecnológica, <http://www.cotec.es>.

co de I+D para la generación de tecnología. Esta separación entre lo que la empresa requiere y lo que la universidad permite ha sido una de las causas fundamentales de la falta de investigación conjunta entre la universidad y la empresa. Debido a ello, en España, salvo contadas excepciones, no fabricamos productos propios de tecnología avanzada, y en algunos casos mucha de la investigación asociada a esos productos, como es el caso de los automóviles, se realiza fuera de nuestro país.

En nuestra Universidad no existe exigencia real para motivar a los investigadores para que sigan investigando. Esto sucede porque no existen normas que obliguen a contemplar la investigación continuada y de calidad, como un requisito indispensable para mantener el puesto de trabajo. La tesis doctoral constituye, la mayoría de las veces, solo un paso intermedio y necesario para optar a una plaza de funcionario. Para lograr ese objetivo, se valoran más los trabajos publicados en revistas y congresos.

Para terminar, quisiera describir los aspectos que he visto en la relación universidad-empresa en nuestro campo de la arquitectura de los computadores y de software en Estados Unidos, que es aplicable también a cualquier actividad relacionada con las TIC. Empresas como IBM, Microsoft, Google, Intel y HP son líderes en estos campos a nivel mundial. Estas empresas están muy interesadas en las ideas producidas en la universidad, así como en las personas que las producen. También están muy interesadas en que los grupos de investigación de las universidades puedan crecer y producir más, ya que ellas serán claramente beneficiadas en el proceso global. Se producen las siguientes colaboraciones. Las empresas financian a algunos estudiantes de doctorado. Durante el año lectivo, investigadores de las empresas visitan las universidades para ver cómo marcha el trabajo de investigación financiado. La investigación es totalmente libre y la universidad puede patentar los resultados. Sin embargo, la empresa puede sugerir hacerlo ella, acordando con la universidad la copropiedad.

Las empresas también ofrecen plazas para que los estudiantes de doctorado pasen algunos meses en las empresas. Allí, los

estudiantes ven realmente los trabajos que las empresas realizan y se integran en los equipos de investigación de las mismas. La experiencia es claramente muy positiva. De hecho, las empresas miman a los estudiantes de doctorado que están realizando buenas tesis, para atraerlos a trabajar con ellos cuando sean doctores. Por tanto, no es de extrañar que muchos estudiantes extranjeros que cursan doctorados en Estados Unidos terminen quedándose en el país, bien en calidad de profesores, o bien integrados en empresas.

En casos excepcionales, si los resultados del grupo investigador son realmente atractivos y tal vez comercializables, se establece otro tipo de relaciones. Por ejemplo, se puede firmar un contrato entre la empresa y la universidad para desarrollar más la idea, o bien se puede transferir la idea a la empresa. Los profesores son contratados como consultores, bien remunerados, de las empresas. Por otra parte, las empresas intentan atraer a los buenos profesores para que pasen sus años sabáticos en sus centros de investigación.

Y todo lo anterior se produce en un país con muy buenas universidades, públicas y privadas, con gran excelencia docente e investigadora. El Gobierno, a través de sus agencias, dedica grandes cantidades de dinero a la investigación y subvenciona a las empresas mediante el acuerdo común en temas de interés. En Estados Unidos, y en otros muchos países, las Administraciones, investigadores y empresas van todos en la misma dirección.

Así pues, algunos países, como Estados Unidos, ya crearon ese entorno hace años y hoy son los dominadores del mercado porque patentaron las ideas que son la base de los productos electrónicos que hoy usa la sociedad: Internet, teléfonos, computadores personales, televisiones... Hace muy pocos años, China, India y otros países del Sudeste asiático empezaron a dedicar muchos recursos a la investigación y hoy están recogiendo ya sus frutos. En el caso concreto de la supercomputación, China tiene en estos momentos el supercomputador más rápido del mundo. Ya han usado parte de su tecnología para el diseño de estas máquinas y parece evidente que en unos pocos

años China podría construir computadores de altas prestaciones usando prácticamente tecnología propia.

Concluyo diciendo, una vez más, que muchas personas creemos en el potencial que tiene la investigación para crear riqueza en un país y que queremos continuar contribuyendo a crear ese ecosistema necesario para producir esas ideas competitivas a las que ningún país moderno puede renunciar.

Querido Rector Magnífico, queridos colegas del claustro de la Universidad, en nombre de mi esposa Ángela, de Teresa y Eduardo y de nuestros hijos Xavier y Carolina, de mi madre Clotilde y hermanos, del resto de la familia y amigos, muchos de los cuales están hoy con nosotros, en nombre también de mis alumnos de doctorado y colaboradores científicos queremos, una vez más, reiteraros nuestro agradecimiento y queremos deciros a todos los que lo habéis hecho posible que estamos muy contentos y orgullosos por esta distinción que hemos recibido de nuestra querida Universidad de Zaragoza. Una ceremonia como la de hoy, aquí en mi tierra, colma toda una vida académica.

Muchísimas gracias a todos.

Mateo VALERO CORTÉS