

Microelectrónica, la revolución de las cosas pequeñas

Lección Inaugural Curso 2005-2006
Roberto Sarmiento Rodríguez

Excelentísimo Rector Magnífico de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria,
Excelentísimas Autoridades, Amigos y Compañeros, Señoras y Señores,

En cierta ocasión un periodista preguntó a Albert Einstein:

— ¿Existe una fórmula para obtener éxito en la vida?

— Sí, la hay.

— ¿Cuál? —preguntó el periodista, insistente.

— Si A representa el éxito, diría que la fórmula es $A=X+Y+Z$, donde X es el trabajo e Y la suerte —explicó Einstein.

— ¿Y qué sería la Z?

Einstein sonrió antes de responder:

— Mantener la boca cerrada

Ésta es una de las múltiples anécdotas que se cuentan de Albert Einstein durante su estancia en Estados Unidos. Siguiendo su fórmula, la esperanza que tengo de tener éxito en esta lección inaugural disminuye con cada palabra que pronuncio. Por ello, seré breve, evitando, como hace Cervantes en la introducción del Quijote, el «*ornato del prólogo*».

1. Introducción

En esta lección inaugural pretendo mostrarles el espectacular avance de la microelectrónica, hoy en día nanoelectrónica, en sus menos de 50 años de vida y el impacto que ha tenido en nuestra sociedad y, en particular, sobre nuestras vidas. La microelectrónica, o si se prefiere la electrónica integrada, es la tecnología que ha permitido realizar los ya populares chips y sobre la que se basa el desarrollo de lo que hoy conocemos por tecnologías de la información y las comunicaciones, en siglas las TIC. Intentaré exponer cuáles son los orígenes, los actores y las causas que han llevado a la microelectrónica a desarrollarse de una forma sin precedentes en el mundo actual, pasando de realizar un

transistor en el año 1959 a integrar en la actualidad más de 1000 millones de transistores en la misma superficie, reduciendo el coste más de 30 millones de veces y creando una industria que mueve más de 200.000 millones de dólares cada año.

La disponibilidad del microchip ha convertido el mundo que nos rodea en un mundo electrónico, ha posibilitado la existencia de los microprocesadores, y ha modificado radicalmente nuestra forma de trabajar, de entretenernos y de relacionarnos. Como ejemplo valga la profunda transformación que ha tenido lugar en los juguetes infantiles o la existencia del teléfono móvil, el cual se ha convertido en un elemento imprescindible en nuestras vidas, de forma que casi con total seguridad más de uno sonará durante esta conferencia.

La pertinencia de este tema viene dada por un conjunto de coincidencias y efemérides que han concurrido en este año y que iré desgranando.

Antes de comenzar la exposición, he de decir que es para mí una responsabilidad enorme, y por supuesto un honor, el dirigirme a ustedes en el acto de inauguración del curso 2005/2006. Quiero agradecer al Consejo de Dirección de nuestra Universidad el haberme elegido para esta grata labor, no exenta de peligros, y si me lo permiten pondría en mis labios los primeros versos del brillante “soneto de repente” de Lope de Vega para hacer referencia al momento que estoy viviendo:

*Un soneto me manda hacer Violante,
que en mi vida me he visto en tanto aprieto;
catorce versos dicen que es soneto,
burla burlando van los tres delante.*

Albergo la esperanza de resolver este “aprieto” de manera tan efectiva como lo hizo Lope de Vega, aunque con algo más de contenido, e intentaré hacerlo, en expresión cervantina, con «*palabras llanas, significantes, honestas y bien colocadas*», aún teniendo en cuenta que no me será posible «*contravenir al orden de la naturaleza; que en ella cada cosa engendra su semejante*».

2. Los inicios

Establecer el inicio de algo es difícil; el mundo es un continuo dominado por el tiempo, en el que el flujo de los eventos, y, por supuesto, el flujo de las ideas, tienen incidencia directa sobre el modo en que transcurren los acontecimientos. Sin lugar a dudas esto ocurre

constantemente en la ciencia. Quizá quien mejor lo supo expresar fue Newton: *«Si he logrado ver más lejos ha sido porque he subido a hombros de gigantes»*.

Establecer, por tanto, un momento, una fecha, un hecho, como único responsable del origen de un descubrimiento es, cuando menos, injusto. Permítanme, sin embargo, y por imposición de la brevedad, establecer el inicio en la realización del primer circuito integrado, hecho que todos admiten como el origen de la microelectrónica.

El primero que concibió la idea de realizar un circuito integrado fue Jack Kilby, un joven ingeniero, que en mayo de 1958 fue contratado por la compañía Texas Instruments para trabajar en un proyecto denominado “Micro-Módulo”. La idea era diseñar unos módulos, cada uno con un elemento electrónico básico, que permitieran su posterior conexión como una especie de “lego” electrónico, y de esta forma acabar con los engorrosos cableados que requería cualquier circuito en aquellos años.

Kilby, al ser nuevo en la empresa, no tenía derecho a las vacaciones que los demás sí disfrutaban y tuvo que enfrentar el problema solo. Fue entonces cuando se le ocurrió una idea: En lugar de crear módulos, sería mejor fabricar todos los elementos de forma conjunta sobre el mismo sustrato, en este caso una pieza de material semiconductor. Tres meses después, ante la mirada escéptica de sus jefes, Jack Kilby probó en el laboratorio el primer circuito integrado, que resultó funcionar perfectamente. El primer chip de la historia era bastante sencillo, contenía un transistor, un condensador y una resistencia sobre la misma base de germanio (que era el material usado).

La empresa Texas Instruments, de la cual hoy diríamos que con Jack Kilby había contratado a un “crack” o un “galáctico”, términos que con toda seguridad entonces tenían otro significado, había sido creada en 1930 para realizar prospecciones petrolíferas y posteriormente fue orientada hacia la electrónica por requerimientos de la II Guerra Mundial.

Una vez que Jack Kilby realizó el primer chip, pocos fueron conscientes (ni siquiera el propio inventor) de que se estaban estableciendo las bases de la ciencia que más influencia ha tenido en el desarrollo de la sociedad. El invento pasó desapercibido y Kilby y sus colegas eran el centro de muchas críticas por parte de los científicos de la época¹, ya que el enfoque tradicional para solucionar este problema era muy distinto del que ellos hicieron. Para popularizar sus beneficios, los dirigentes de Texas Instruments decidieron aplicar esta nueva técnica al desarrollo de una calculadora de bolsillo que sustituyera los grandes y

pesados equipos de la época. Nueve años más tarde, en 1967, Kilby patentó la calculadora electrónica de bolsillo, sin duda la más popular de las sesenta patentes que realizó.

A pesar del enorme impacto que ha tenido en la sociedad, el invento del circuito integrado sólo fue reconocido con el premio Nobel cuarenta y dos años después, exactamente en el año 2000, cuando Jack Kilby contaba ya con 77 años de edad y, en realidad, recibió medio premio, ya que lo compartió con Zhores I. Alferov y Herbert Kroemer.

La historia no estaría completa si no se menciona a Robert Noyce. Según William Shockley, Noyce era uno de los “ocho traidores”, ya que en 1957 junto con otros siete empleados abandonaron su empresa, Shockley Semiconductor, para fundar Fairchild Semiconductor, que a la postre sería la empresa que mayor impacto tendría en los estadios iniciales del desarrollo del chip². La apuesta de estos “traidores” no era sencilla porque un año antes, en 1956, Shockley, conjuntamente con Bardeen y Brattain, había sido laureado con el Premio Nobel por el invento del transistor.

Robert Noyce, uno de los cofundadores de Intel, realizó, de manera independiente a Kilby, el primer circuito usando silicio como material semiconductor y conexiones mediante deposición de vapor, técnica que facilitaría la comercialización masiva del chip y la reducción de costes. Noyce conoció los trabajos de Kilby cuando fue a inscribir su patente en julio de 1959. Después de años de batalla legal, Texas Instruments y Fairchild decidieron compartir sus investigaciones, lo que permitió a Fairchild producir su primer circuito integrado comercial en 1961. En definitiva, Jack Kilby inventó el circuito integrado y Robert Noyce la técnica que permitía reproducirlo industrialmente.

Jack Kilby falleció, después de una breve lucha contra el cáncer, el pasado 20 de junio, a la edad de 81 años, convertido en uno de los pocos hombres que han podido ver cómo su visión y sus logros profesionales han cambiado el mundo. Kilby, tan admirado por su genialidad como por su generosidad, siempre se mostró maravillado de la evolución de la microelectrónica. En una entrevista realizada cuando recibió el premio Nobel dijo: *«Es cierto que la idea original fue mía, pero lo que vemos hoy en día es el trabajo de probablemente decenas de miles de los mejores ingenieros del mundo, concentrando esfuerzos en mejorar los productos y reducir costes»*.

El nacimiento de la microelectrónica supone la transición de los componentes individuales al circuito integrado, compuesto por un chip o pequeño cristal semiconductor

que contiene gran cantidad de elementos individuales en forma miniaturizada. Con esta técnica de integración se logra una mayor complejidad de circuitos, menores dimensiones, mayor fiabilidad, a un coste de fabricación más reducido.

Pero tal vez lo más importante del invento del circuito integrado es que abrió la puerta a los microprocesadores, ya que acababa con el dilema conocido en la primera mitad del siglo XX como la “tiranía de los números”, que indicaba que para hacer un computador haría falta un número ingente de dispositivos individuales y, por tanto, sería inservible dada la cantidad de espacio que ocuparía, su elevado consumo de energía y su disparatado coste.

3. La Ley de Moore

«La mejor forma de predecir el futuro es inventándolo». Esto, aunque parezca una paradoja, es lo que ha ocurrido con la microelectrónica. Desde hace cuarenta años conocemos su futuro. Gordon Moore, Presidente Emérito de Intel, lo plasmó en 1965 en un simple artículo de cuatro páginas. Desde ese momento no resulta muy evidente si lo que decía era cierto o simplemente si miles de investigadores de todo el mundo se han empeñado en hacerlo cierto. La realidad es que esas cuatro páginas han revolucionado el desarrollo de las tecnologías de la información y la sociedad del último tercio del siglo XX y principios del siglo XXI³.

El artículo fue publicado en el número del 19 de abril de la revista *Electronics*⁴. Gordon Moore, sobre la base de los circuitos realizados hasta ese momento en Fairchild, empresa para la que trabajaba, concluía que el número de componentes por circuito se duplicaría cada año, vaticinando que en 1975 sería posible integrar 65.000 componentes en un chip de silicio de unos 6 milímetros cuadrados. En 1975, Moore verificó su previsión y la suavizó para el futuro indicando que el crecimiento exponencial seguiría pero a razón de duplicar la densidad cada 18 meses⁵, estableciendo así la conocida Ley de Moore que ha definido con asombrosa precisión y sencillez la evolución de la microelectrónica en los últimos cuarenta años.

Este fenomenal desarrollo ha sido motivado por la reducción constante del tamaño de los transistores y, como consecuencia, de la posibilidad de incluir más en la misma superficie. Cada 18 meses se reduce la longitud característica (tamaño del terminal de puerta de los transistores) en un factor de 0,7; hecho que ha sido posible gracias al desarrollo de los nuevos métodos y la mejora constante de los equipos de fabricación. En la

actualidad las fábricas de chips están introduciendo tecnologías que tienen una longitud característica de 65 nm (nanómetros, 10^{-9} metros) y la de 90 nm ya es comercial.

La reducción del tamaño en un factor de 0,7 permite multiplicar por 2 el número de componentes por milímetro cuadrado, lo que ha llevado a que en 1971 fuera posible integrar unos 2300 transistores en un chip —4004, primer microprocesador creado por Intel—y antes de final de año puedan integrarse unos 1700 millones de transistores; o a realizar dispositivos de memoria con treinta y dos mil millones de bits, suficientes para almacenar cuatro veces todas las obras de Shakespeare en un solo circuito integrado.

Las tecnologías de la información son una realidad gracias a la continua caída de precios de los semiconductores. El rápido decrecimiento de costes se ha transmitido de forma inmediata a un número de productos que influyen directamente en la sociedad de la información, como es el caso de los ordenadores y los equipos de telecomunicación. En 1954 el precio de un transistor era de 5,52\$ y cincuenta años más tarde, en 2004, este precio había bajado a 191 nanodólares (una mil millonésima de dólar), es decir una reducción de más de 30 millones de veces.

En 1998 Gordon Moore resumió el desarrollo de la microelectrónica de la siguiente forma: *«Si la industria del automóvil hubiese avanzado tan rápidamente como lo ha hecho la industria de los semiconductores, un Rolls Royce podría recorrer 200 mil kilómetros con un litro de gasolina, y sería más barato tirarlo a la basura que aparcarlo».*

Según los expertos, a la Ley de Moore todavía le quedan unos diez o quince años de vida. Lo que quiere decir que el progreso exponencial durará hasta el año 2015 o el año 2020. Para esa época será posible realizar un microprocesador en un único chip de 1 billón de transistores, con una frecuencia de operación de 20 a 30 giga-hercios (GHz) y podría ejecutar 1 tera (10^{12}) operaciones por segundo. Es decir, para realizar un supercomputador como el MareNostrum necesitaríamos sólo 40 microprocesadores en lugar de los 4564 procesadores PowerPC de 2,2 GHz que tiene en la actualidad. El supercomputador MareNostrum está instalado en el Centro de Supercomputación de Barcelona y, según datos de junio de 2005, es el quinto más rápido del mundo.

El principal reto planteado al desarrollo de la microelectrónica es el manejo de la energía que se genera en los chips. Este es un problema que no existía hace pocos años, pero el número ingente de elementos que se integran en áreas tan reducidas y las elevadas frecuencias que se consiguen en estos días hacen de éste un grave inconveniente. Debido a

que el consumo de potencia es proporcional a la frecuencia y al cuadrado de la tensión de alimentación, hasta ahora el problema se había resuelto por reducción constante de las tensiones de alimentación, alcanzando en la actualidad valores por debajo del voltio.

En una conferencia⁶ celebrada en 2001, Patrick Gelsinger, Vicepresidente de Intel, comentaba que si el progreso continuaba al mismo ritmo «en 2005, los procesadores de alta velocidad tendrán la misma densidad de potencia que un reactor nuclear, en 2010, que la de la tobera de un cohete, y en 2015, que la de la superficie del sol». Gelsinger se refería a la ineficiencia energética que tienen los microprocesadores para realizar operaciones, que necesitan 100 veces más energía que si esas operaciones se realizasen con hardware específico. Pero sus palabras se malinterpretaron en el sentido que Intel ya no podría hacer en el futuro microprocesadores más rápidos y la consecuencia inmediata fue que las acciones de esta empresa bajaron un 8% al día siguiente.

Sin duda, el artículo de *Electronics* del año 1965 es el que mayor impacto ha tenido en el desarrollo de la microelectrónica y el que mayor índice de citas ha tenido en la historia de esta ciencia. Moore indicaba en su artículo que esta evolución exponencial daría lugar a muchas “maravillas” tales como ordenadores personales, control automático en los coches y equipos personales de comunicación. Y no se equivocó.

4. La generación D

Sin embargo, el conocimiento de Gordon Moore en esa época estaba bastante alejado de los intereses de la opinión pública en general, que estaban más centrados en la guerra fría y en la carrera espacial. Los sentimientos negativos que existían entonces respecto a la tecnología quedaron reflejados en la película que en 1968 realizaría Stanley Kubrick “*2001: una odisea del espacio*”, donde un supercomputador denominado HAL es el que tripula y controla el “*Discovery*” y que incluso es capaz de ir eliminando a la tripulación que puede poner en peligro la misión. HAL es el prototipo de computador que la ciencia ficción imaginó: enorme y omnipresente. Pero resulta curioso comprobar cómo la ciencia ficción no fue capaz de prever la existencia de los ordenadores portátiles, ni de internet.

Cuatro décadas después las cosas son muy diferentes. La electrónica, los ordenadores, internet, el software, las comunicaciones móviles... todo aquello que está bajo la etiqueta de las tecnologías de la información, atrae poderosamente la atención. Los niños anhelan tener la última plataforma para juegos, los adolescentes el móvil de última generación o el reproductor de mp3 más pequeño y con mayor capacidad, los jóvenes estudiantes el

ordenador portátil más potente y ligero, los mayores el televisor de pantalla más grande para el salón de casa. De esta forma podríamos continuar, casi hasta enumerar prácticamente todos los aspectos de nuestra vida, incluyendo elementos que sin duda hace un par de décadas constituían parte de la ciencia ficción, y que están influyendo de tal manera en las nuevas generaciones hasta convertirlas en la generación digital o generación D.

Nuestros hogares se han visto invadidos por un conjunto de cosas pequeñas cada una de las cuales está pensada para satisfacer una necesidad. Esta situación, en la que proliferan los dispositivos, viene determinada por la tradicional separación entre los sistemas de computación y los sistemas de comunicación. Hoy en día convergen rápidamente, así el ordenador personal sirve cada vez más para comunicarse y el teléfono móvil incluye funciones antes impensadas: En la actualidad se venden más cámaras digitales integradas en teléfonos móviles que como productos independientes.

La tendencia nos encamina hacia lo que se denomina inteligencia ambiental. En este entorno inteligente todos los elementos se conectan entre sí de forma inalámbrica y la computación se encuentra distribuida e integrada en el entorno (computación ubicua). Además, los elementos tradicionales pasan a tener nuevas funciones, por ejemplo la televisión será el elemento principal del control del hogar y nuestro principal acceso a internet y dispositivos que ahora parecen imprescindibles dejarán de serlo, como quizá ocurra con el ordenador personal de sobremesa, el PC. En cualquier caso, los cambios no serán repentinos pero sí ocurrirán de forma rápida.

Para crear un verdadero contexto de inteligencia ambiental no será suficiente estar conectado mediante redes inalámbricas de forma constante o tener capacidad de computación ubicua (lo que aporta la inteligencia), será necesario que los sistemas electrónicos tengan capacidad de “sentir” y de “actuar” según las formas en las que nos comunicamos habitualmente con el medio.

Esta habilidad la proporcionan los MEMS (*MicroElectroMechanical Systems*), que son sistemas mecánicos y eléctricos en miniatura. Estos dispositivos mecánicos tienen tamaños que varían entre una micra y un milímetro y pueden construirse en unidades individuales o, de forma similar a los transistores, conjuntamente por millones. Los MEMS utilizan la misma tecnología y materiales que la microelectrónica aprovechando las sinergias que se crean por las inversiones y desarrollos que se hacen en la tecnología de fabricación de circuitos integrados. Los MEMS son sistemas en tres dimensiones frente a los electrónicos

que se realizan en dos dimensiones. En su diseño se aplican los fundamentos básicos de la ingeniería eléctrica y la ingeniería mecánica, teniendo en cuenta que debido a su tamaño cambian los equilibrios con respecto a los correspondientes elementos macroscópicos y que para realizar una función concreta existe la flexibilidad de conectar multitud de elementos individuales en paralelo.

Los sistemas micro electro-mecánicos no se restringen a una sola aplicación o tecnología sino que pueden usar una variedad de ellas para crear elementos que abarcan un sinnúmero de aplicaciones. Entre ellas podemos citar motores en miniatura, engranajes, sensores de gases, biosensores, etc. Los dispositivos MEMS ya están incluidos en importantes aplicaciones que van desde el automóvil, sistemas de navegación, impresoras y muchos aspectos de la biomedicina.

En la actualidad es difícil predecir a largo plazo el impacto económico de la industria de los semiconductores, pero si tenemos en cuenta el retraso que existe entre la tecnología disponible y la que se usa comercialmente, es evidente que su influencia se hará sentir con fuerza en el desarrollo de la sociedad durante bastante tiempo. Incluso si esta fabulosa progresión tecnológica se detuviera hoy, podríamos estar décadas desarrollando miles de nuevos productos con la tecnología disponible.

5. *Microelectrónica: Cuando «la imaginación es más importante que el saber»*

Pensarán ustedes que mis palabras son una invitación a permanecer sentados y dejar que esta avalancha tecnológica nos caiga encima, como el rocío que inadvertida pero tangiblemente nos empapa, y así, sin darnos cuenta, seamos impelidos hacia la sociedad de la información. Nada más lejos de mi intención; les animo a que piensen todo lo contrario; a que comprendan el número de oportunidades que esta revolución trae consigo y que no podemos perder.

El desarrollo tecnológico brinda una nueva posibilidad cada día, como la que proporciona un enorme tren en el que a la postre es indiferente entrar en el primer vagón o en el último. Lo importante es el destino, no la posición en la que se viaja. Aunque, España, y posiblemente también Europa, hayan perdido unas buenas posibilidades de desarrollo, y no seguiré la tentación de dar cifras que están recogidas en muchos informes y son archiconocidas.

Digo esto porque quizá lo más sobresaliente de todo este fantástico progreso es que la tecnología necesaria para diseñar y desarrollar estos circuitos integrados está al alcance de cualquier centro universitario o pequeña empresa. Después de 40 años de existencia de la Ley de Moore, durante los cuales las grandes compañías han llevado la iniciativa, se están abriendo muchas posibilidades de negocio para las PYMES —o *start-ups* en terminología del sector—, más flexibles, más dinámicas y mejor preparadas para la innovación que las grandes empresas. El mercado requiere soluciones flexibles y económicas, pero que además estén adaptadas a las necesidades particulares de cada empresa, lo que está creando muchos nichos de mercado en los que las empresas pequeñas tienen mayores opciones de éxito que las grandes.

El coste de las fábricas de circuitos integrados se ha incrementado debido a la sofisticación de los equipos requeridos, llegando a ser en la actualidad unos 2.000 millones de dólares. Esto básicamente significa que el número de fábricas se ha reducido con el tiempo y que para su amortización requieren un gran volumen de ventas —sin embargo, el conocimiento y los suministradores de equipos para fábricas de chips se han extendido a tal punto que prácticamente cualquiera con el dinero suficiente puede establecer una—. En el pasado cada empresa que hacía diseño tenía su propia fábrica y en la actualidad la tendencia es justo la contraria, generando una apertura en el mercado e igualando a las empresas grandes y pequeñas en cuanto a las oportunidades de negocio. La participación en el mercado de las empresas sin fábrica (las denominadas “*fabless*”) constituye en la actualidad el 11% del total y, se estima, que en el 2010 coparán el 50%. En definitiva, el mayor negocio se ha trasladado desde la fabricación de chips a su concepción y diseño.

Es conocido que los métodos y técnicas para diseñar los circuitos integrados tienen un retraso importante con respecto a la tecnología. Mientras la complejidad tecnológica aumenta anualmente un 58%, la productividad en el diseño apenas mejora cada año un 21%. Hablando en términos de funciones que pueden ser introducidas en un chip, cada generación tecnológica multiplica por dos su número para chips del mismo tamaño, mientras que el coste permanece constante. Por tanto, cada generación tecnológica, cada año y medio, el número de personas necesarias para diseñar un milímetro cuadrado de un chip se duplica. La realidad dice que el número de ingenieros que se titulan en las universidades no se duplica cada 18 meses. Más bien, en los países desarrollados, dice todo lo contrario: El número de estudiantes que toman la opción científico-técnica se ha

estancado, cuando no disminuido. Éste es uno de los problemas más graves para sacar partido a esta tecnología.

La solución que ha tomado la industria se denomina “propiedad intelectual” (IP de “*Intellectual Property*”). El diseño se divide en dos fases, realización de las funciones básicas o IPs y posteriormente su integración en un único chip. Los sistemas los llevan a cabo las grandes empresas con capacidad de llegar a los grandes mercados, pero los IPs pueden ser realizados por pequeños grupos con pocos medios. Cada chip, entendido como un sistema electrónico, se diseña hoy con participación de varias empresas o centros de diseño, incluso radicados en distintos países.

La idea básica es que estas funciones, o IPs, se reutilicen en diferentes chips, reduciendo su coste, por amortización, y su tiempo de diseño. En la actualidad una buena cantidad de IPs se comercializan a través de internet, e incluso existe ya una plataforma para el “hardware abierto”, en la cual se pueden conseguir varios módulos funcionales de gran complejidad (microprocesadores, interfaces USB, PCI, etc.). El límite está en la imaginación y en la capacidad de innovar de los diseñadores. Lo importante en este caso son los recursos humanos, las ideas y la calidad de su trabajo. Estoy de acuerdo con el argumento de Albert Einstein cuando decía que «*la imaginación es más importante que el saber*», porque es la imaginación la que nos hará entrar en la era de la ingeniería de las ideas o, si se prefiere, ingeniería de la innovación.

Este fenómeno está desarrollándose de forma muy rápida en los países tecnológicamente más avanzados, los cuales tienen que importar los recursos humanos porque les son escasos. Resulta sorprendente notar cómo un grupo de jóvenes ingenieros de nuestra tierra están participando en esta revolución pero a kilómetros de distancia de sus casas y de la universidad que los formó. Y más sorprendente saber que, dado nuestro entorno industrial, difícilmente podrán regresar a desarrollar los conocimientos y experiencias que han adquirido con tanto esfuerzo. En un alarde de auténtica generosidad y sabiduría estas islas atlánticas exportan mano de obra cualificada y al mismo tiempo importan mano de obra menos cualificada.

A pesar de que hay un conocido dicho que reza que: «*Una de las formas más rápidas de arruinarse es invertir en una empresa tecnológica que empieza*», siempre me he preguntado la razón que hace imposible hacer aquí lo que sí hacemos fuera. Disponemos de todos los elementos requeridos: personas con la inteligencia, la formación y la imaginación

necesarias, universidades con buen nivel de investigación, redes de comunicación avanzadas, e incluso fuentes de capital.

Un amigo, hoy presente, hace tiempo me contó que su abuela repetía con insistencia que *«en la vida hay que ser discretamente ambicioso»*. Siempre pensé que en esta frase podía concretarse toda la sabiduría de nuestras abuelas, que, por el devenir de los tiempos que les tocó vivir, acumularon una importante experiencia durante sus vidas. La ambición es necesaria para avanzar, entendida, claro está, como esa necesidad interna de mejorar, establecerse metas y poner los medios para conseguirlas. El “discretamente ambicioso” elimina la jactancia, que en algunas ocasiones va ligada a la ambición, lo cual, pienso que por desgracia, es muy común en nuestros días.

La ambición es necesaria para establecer la mirada en el horizonte del futuro y para tener la resolución suficiente que permita poner los medios en su consecución, sin desviaciones propiciadas por acciones coyunturales más o menos oportunistas. Desgraciadamente, pocas veces se dan estas circunstancias en los gobiernos de los pueblos y, quizá, uno de los ejemplos más pertinaces de esto es el impulso que se da a la ciencia y a la tecnología. Todos coinciden en que la ciencia es necesaria, no, fundamental, para el desarrollo de los países, pero en raras ocasiones se ha impulsado de forma definida y mucho menos definitiva.

Ya no son necesarios ni análisis, ni planes; en innovación tecnológica será más efectivo un fuerte impulso, aún siendo desorganizado, que un plan a destiempo. En esta área la promoción indirecta, financiar actividades, es más efectiva que la promoción directa, financiar proyectos concretos. Según Juergen Donges *«las actividades tecnológicas punteras no van a nacer simplemente porque lo invoquen los políticos»*⁷.

Las bases necesarias para desarrollar el sector de alta tecnología, y en este caso me refiero al sector de la microelectrónica, radican en comprender lo que se puede hacer, creer en sus potencialidades, y arriesgar, invertir y esforzarse por explotarlas. Es fundamental generar y aplicar ideas propias para llevar a cabo esta tarea; copiar miméticamente lo que hacen otros países, comunidades, o entidades, reducirá las posibilidades de éxito. Tenemos que ser originales, distintos y distinguibles. Finalmente, no debemos olvidar que Robert Noyce nos enseñó que *«El optimismo es un ingrediente esencial para la innovación»*.

Se dice que en cierta ocasión unos etnólogos estudiando una tribu balinesa se percataron de que no tenía obras de arte. Al preguntarle a un miembro de la tribu dónde

estaban sus objetos de artes decorativas éste contestó: «*Nosotros no tenemos arte, todo lo hacemos bien*». Me da la impresión que el mismo desprecio que esta tribu tenía por el arte nosotros lo tenemos por las posibilidades que ofrece la tecnología. Pensamos que no la necesitamos y que podemos mantener nuestro desarrollo y bienestar sin necesidad de aplicar ningún esfuerzo a diversificar nuestra economía. Espero que algún día, cuando se nos pregunte por la tecnología, dejemos de contestar: «*Nosotros no tenemos tecnología, todo lo hacemos bien*».

6. Nanoelectrónica: la revolución continúa

Pero si en la actualidad vivimos la revolución de las cosas pequeñas, en un futuro cercano nos espera la revolución de las cosas muy pequeñas. Richard Feynman, premio Nobel de Física en 1965, pronunció su famosa conferencia “Hay espacio suficiente abajo del todo” en el Instituto Tecnológico de California en 1959 iniciando la nanoelectrónica y, en general, la nanotecnología. Feynman propuso la manipulación de moléculas y átomos de forma individual, como si se tratara de un juego de canicas en el cual las colocáramos de forma precisa una detrás de otra. Cuando se trabaja a esta escala tan minúscula aparecen fenómenos y nuevas propiedades que permiten crear materiales, máquinas y sistemas con características únicas. Desgraciadamente Feynman se encontró con una barrera insalvable para llevar a la práctica sus ideas revolucionarias: la imposibilidad de ver a escala nanométrica. Tuvo que esperar más de veinte años, hasta 1982, cuando Rohrer y Binning, dos científicos del laboratorio de IBM de Zurich galardonados con el premio Nobel cuatro años más tarde, idearon el microscopio de efecto túnel, mediante el cual lograron una imagen de alta resolución de la estructura atómica de la materia.

Hoy, la nanotecnología es una realidad y, a nivel experimental, se están desarrollando nuevos descubrimientos en laboratorios de todo el mundo que serán comerciales en un lustro o una década. Las posibilidades son infinitas y abarcan diversos campos de aplicación. En medicina, será posible construir “nano-robots” de tamaño sub-celular que puedan recorrer el cuerpo humano para detectar de manera precoz enfermedades como el cáncer y que depositen fármacos en el lugar adecuado para eliminar tumores sin afectar el resto del organismo. En medioambiente, se podrán seleccionar máquinas que eliminen la contaminación tomando su energía de ella. La creación de nanotubos, red de átomos de carbono enrollada de forma cilíndrica, ayudará a construir automóviles, aviones y edificios con menor peso y mayor resistencia.

7. Una revolución de la sociedad, no una revolución social

Hoy en día el mundo produce más transistores que granos de arroz y lo hace a un precio más económico. Según las cifras del último año se fabrican más de 100 millones de transistores por cada una de las personas que habitan el planeta. La electrónica de consumo y la sociedad de la información, entre otros aspectos del desarrollo humano, han generado un mundo más vivible, más cercano, más global (en el sentido positivo).

Sin embargo, la distribución de esta tremenda producción es muy irregular. Seguimos empeñados en tener varios mundos en uno; y con el transcurrir del tiempo existe el peligro de que, cada vez más, el primer, el segundo y el tercer mundo estén más separados. Como decía Paul Eluard “*hay otros mundos, pero están en este*”. Y si bien la tecnología ha permitido tener más información, más imágenes, de estos otros mundos, seguimos desconociéndolos tanto como antes.

Antes las catástrofes y las injusticias quedaban ocultas por la falta de sistemas de comunicación, en la actualidad quedan ocultas por la saturación de información que sufrimos, que las convierten en un elemento más del inmenso crisol que nos “golpea” diariamente. Hoy, en un día cualquiera, recibimos más información que la que recibía Shakespeare en un año de su vida.

Esta avalancha de información ha anestesiado nuestras mentes, y determinadas cuestiones parecen hasta normales y dignas de espectáculo, tal como plasmó Pedro García Cabrera en su poemario “Ojos que no ven”:

*La destrucción se ha puesto
en mangas de camisa.
Ha tomado los hábitos
del aire azul y de la mano abierta,
del beso y la caricia
en los que nunca procreó el recelo.*

Es uno de los inconvenientes que tiene todo crecimiento exponencial. En la historia se pueden encontrar ejemplos similares, aunque nunca antes una revolución de este tipo haya influido a tantas personas ni a tantas culturas. La inestabilidad que genera el dramático cambio de nuestro entorno con la pérdida de los sistemas, métodos y mercados tradicionales, se contrapone a la creación de nuevas e interesantes oportunidades.

Este desarrollo espectacular está modificando las pautas de conducta de la sociedad. La infancia de los niños de la generación D no tiene parangón con la infancia que nosotros

tuvimos. El desarrollo de la sociedad del bienestar es ahora evidente, la forma de jugar, de relacionarse, de pensar de los niños de hoy es muy diferente a las de generaciones precedentes. Se ha dicho en múltiples ocasiones que la tecnología ha dado lugar a niños más solitarios, menos solidarios y más egoístas. Lo cierto es que en la tecnología los niños han encontrado una nueva forma de interacción con el mundo que les rodea y con sus semejantes.

Quizá en pocos periodos de la humanidad los niños se han comunicado tanto entre sí, eso sí, de forma diferente a como lo hicimos nosotros o como lo hicieron nuestros padres. Estoy seguro de que una parte del trillón de correos electrónicos que se intercambiaron en el año 2003 se originó y tuvo su destino en ellos. Ciertamente la tecnología ha puesto a su alcance poderosos mecanismos para comprender y mejorar el mundo.

8. A modo de conclusiones

Desde tiempos inmemoriales la humanidad ha mirado primero al cielo, y luego al Universo, en busca de respuestas a las preguntas fundamentales que se hace sobre su existencia. Algunas de ellas todavía están ahí. Pero, ha sido sólo cuando ha mirado al interior de la materia cuando ha logrado transformar su vida, ha encontrado un medio para conocerse a sí misma y para conocer más profundamente a la naturaleza. Sin lugar a dudas, las cosas pequeñas son las que marcarán el desarrollo de la humanidad en el siglo XXI.

El invento del microchip ha abierto aplicaciones a la electrónica casi en cualquier campo: la informática, las comunicaciones, la medicina, la automoción, el espacio, la robótica, etc. La electrónica del siglo XXI seguirá proporcionando nuevas y sorprendentes cosas pequeñas que cambiarán nuestra forma de trabajar, de entretenernos y de relacionarnos. Tengo la esperanza de que en este fastuoso, y a veces abrumador, desarrollo no dejemos de tener presente la importancia de esas otras pequeñas cosas que nos hacen vivir cada día.

Muchas gracias.

-
- ¹ Jack S. Kilby, “Turning Potencial Into Realities: The Invention of the Integrated Circuit”, Conferencia del Nobel, 8 de diciembre de 2000.
- ² Gordon E. Moore, “The Role of Fairchild in Silicon Technology in the Early Days of Silicon Valley”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 1, enero 1998.
- ³ Los hay que opinan que fueron las demandas de la sociedad las que originaron el espectacular desarrollo de la Microelectrónica e incluso otros que afirman que la Ley de Moore es completamente falsa. Ver Ilkka Tuomi, “The lives and Death of Moore’s Law”, (www.firstmonday.org/issues/issue7_11/tuomi/).
- ⁴ El único original del artículo que tiene Intel fue adquirido a un ingeniero de Surrey, UK, el pasado mes de abril por 10.000 dólares (<http://news.bbc.co.uk/1/hi/technology/4472549.stm>).
- ⁵ Gordon Moore nunca dijo 18 meses, en su artículo de 1975 se refirió a 24 meses. La predicción se corrigió posteriormente por el *Internacional Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS)* para adecuarla a la realidad (www.itrs.net).
- ⁶ Patrick Gelsinger, “Microprocessors for the new millennium: Challenges, opportunities, and new frontiers”, *Solid-State Circuits Conference, 2001. Digest of Technical Papers. ISSCC. 2001 IEEE Internacional* 5-7 febrero, 2001 Páginas: 22 – 25.
- ⁷ Juergen Donges, “Como fomentar la innovación tecnológica”, ABC, 28 de junio de 2005.