



**Academia de Ciencias Matemáticas,  
Físico-Químicas y Naturales de Granada**

**EL ARTE DE JUGAR CON ELECTRONES**

DISCURSO LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN  
COMO ACADÉMICO CORRESPONDIENTE POR EL

**ILMO. SR. D. FRANCISCO GÁMIZ PÉREZ**

Granada, 2020





**Academia de Ciencias Matemáticas,  
Físico-Químicas y Naturales de Granada**

**EL ARTE DE JUGAR CON ELECTRONES**

**DISCURSO LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN  
COMO ACADÉMICO CORRESPONDIENTE POR EL**

**ILMO. SR. D. FRANCISCO GÁMIZ PÉREZ**

Granada, ~~2020~~



“En algún lugar algo increíble está  
esperando a ser descubierto”  
Carl Sagan.



## **EL ARTE DE JUGAR CON ELECTRONES**

**FRANCISCO GÁMIZ PÉREZ**

**Excmo. Sr. Presidente de la Academia de Ciencias  
Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales de Granada,  
Excelentísimos e Ilustrísimos Señoras y Señores  
Académicos,  
Compañeros y Amigos,  
Señoras y Señores,**

Ante todo, quiero expresar mi profundo y sincero agradecimiento a la Academia de Ciencias Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales de Granada, y en especial a su Sección de Ciencias Físico-Químicas, por haber propuesto mi candidatura para ingresar como miembro académico correspondiente, y a todos los académicos por su unánime

acogida en esta docta institución, lo que es para mí un gran honor y un sueño que hoy se hace realidad.

~~Muchas gracias a su Presidente, Prof. Enrique Hita Villaverde, porque gracias a su empeño, a su empeñamiento, y a su apoyo hoy estoy aquí. Espero no defraudar la confianza y las expectativas que ha puesto en mí.~~

Muchas gracias también al Prof. Alberto Prieto Espinosa, Presidente de la Sección de Físico-Químicas, por haber tenido la generosidad de ser mi padrino y pronunciar el discurso de contestación. Además de haber sido mi profesor, al Prof. Prieto me unen los años, discusiones, reuniones y trabajos, que dedicamos conjuntamente para la creación del Centro de Investigación en Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, uno de los centros de referencia de nuestra Universidad, y al que como detallaré a continuación, está ligada mi actividad investigadora.

## **La Electrónica, el Internet de las Cosas y la Inteligencia Artificial.**

Desde hace años, y, como casi todo humano, hoy, después de levantarme y pasar por la ducha, he tenido que hacerme el desayuno. El café, las tostadas y el zumo. Día tras día. Pero a veces imagino que al bajar del dormitorio y entrar en la cocina



me encuentro mi desayuno en su justo punto: tostadas crujientes, café caliente y zumo de naranja recién exprimido. Y cuando no he dormido bien, estoy enfermo, o la cena con los amigos se prolongó más de la cuenta, en vez de café y tostadas me encuentro una infusión. Y lo mejor de todo, es que yo no me he enterado de nada. Algunos pensarán que esto es lo que una madre hace por sus hijos. Pero esto será también la Inteligencia Artificial y el Internet de las Cosas.

Dentro de poco, mi colchón tendrá unos sensores que sabrán cuanto he dormido, mi temperatura y mi ritmo cardiaco; incluso si he dormido bien, si tengo sed, si tengo hambre, si me duele la cabeza.... Además, en toda la casa habrá sensores de movimiento y de presencia, y sabrán cuando me levanto, cuando entro en el baño, cuando salgo de la habitación y bajo las escaleras para tomar el desayuno. Encontraré justo lo que necesito, en su punto, sin preocuparme absolutamente de nada, ni tan siquiera de hacer la compra y reponer la nevera.

Esto es sólo un ejemplo de cómo el internet de las cosas y la inteligencia artificial cambiarán nuestra rutina diaria en unos pocos años; y en todo esto juega un papel fundamental, imprescindible, la Electrónica. La Electrónica ha cambiado nuestras vidas de manera espectacular en estos primeros años del siglo XXI. Hoy se hacen cosas que eran inimaginables hace sólo unos años, y lo que es más importante, hoy no

sabríamos vivir sin la Electrónica. En apenas cincuenta años, la Tecnología Electrónica ha cambiado la Humanidad tal como la conocíamos tras una evolución que duró miles, si no millones de años.

¿Pero, qué es la Electrónica? ¿Por qué esa capacidad? El diccionario de la Real Academia de la Lengua define la Electrónica como “el estudio y aplicación del comportamiento de los electrones en diversos medios, como el vacío, los gases y los semiconductores, sometidos a la acción de campos eléctricos y magnéticos”.

Pero la Electrónica hoy, es también, la tecnología facilitadora que permitirá el desarrollo de la Inteligencia Artificial.

### **La era pre-Electrónica**

El estudio de las propiedades eléctricas de los materiales es un esfuerzo que viene de muy lejos. Ya Tales de Mileto en el 600 aC comentó la habilidad del ámbar por atraer otros objetos [1]. Algún tiempo posterior, en el año 1600 dC, William Gilbert usó la palabra griega para ámbar, “elektron”, para describir el campo que rodea a un objeto cargado [2], y de donde derivamos los términos electrón, campo eléctrico o Electrónica.

Sin embargo, el conocimiento sistemático de cómo los electrones se comportan dentro de los diferentes materiales y

el amplio uso de los fenómenos eléctricos, tuvo que esperar a avances muchos más recientes en la comprensión básica de los campos electromagnéticos y la física de partículas. A diferencia de otros sistemas y técnicas que se pudieron desarrollar tecnológicamente e incluso encontrar aplicaciones en la vida cotidiana mucho antes de que se desarrollaran las teorías científicas que las explicaran, las aplicaciones eléctricas y electrónicas no llegaron a la Sociedad hasta bien entrado el siglo XIX. Avances como los puentes, la navegación, relojes mecánicos, metalurgia, espejos y lentes y otras muchas se desarrollaron mucho antes de contar con un soporte teórico que justificara el comportamiento de estos sistemas físicos. No es sorprendente, por tanto, que, en el siglo XVIII, cuando estalla la revolución industrial, lo haga de la mano del vapor, del carbón, del gas, de la producción química, de la minería, de la metalurgia, y de otras industrias cuyas bases se habían establecido durante miles de años [3]. La electricidad estuvo totalmente ausente.

Los primeros avances hacia una comprensión racional de la electricidad y el magnetismo comenzaron a aparecer en la segunda mitad del siglo XVIII con los experimentos pioneros y deducciones de Cavendish, Coulomb, Gauss, Oersted, Ampere, Faraday y otros muchos. Todos estos importantes

resultados condujeron a Maxwell a formular la teoría clásica del electromagnetismo en 1864 [4].

Otro hecho importante, que permitiría grandes progresos posteriores, fue la capacidad de disponer de una fuente de energía eléctrica estable, en la forma de una celda electroquímica o batería, demostrada por primera vez por Volta en 1800 [5]. Las baterías permitirían que corrientes eléctricas circularan de manera continua por un circuito y se pudiera estudiar de esta forma el transporte electrónico en diferentes materiales. En 1821 Seebeck con el descubrimiento del efecto termoeléctrico [6], proporcionó otra fuente estable de energía eléctrica. Hacia 1826, todos estos avances permitieron a Ohm realizar experimentos que le condujeron a formular su famosa ley que relaciona la tensión y la corriente en un conductor [7], [8], y en 1841 Joule estableció que la cantidad de calor disipada en un resistor al pasar por él una corriente es proporcional al cuadrado de su resistencia [9].

Hacia finales del siglo diecinueve y principios del siglo veinte, el estado de la ciencia y de la ingeniería empieza a entrar en lo que podríamos llamar la era moderna: Thomson identificó el electrón hacia 1897 [10] y Millikan midió su carga de manera precisa en 1909 [11]. Todos estos resultados condujeron a la aparición de la física del estado sólido y a una mayor comprensión de las propiedades electrónicas de los sólidos,

incluyendo la teoría de bandas, y la explicación de porqué unos sólidos conducen la electricidad mientras que otros son intrínsecamente aislantes [12]. Es importante enfatizar una vez más que el trabajo de los primeros investigadores en la ciencia de la electricidad, el magnetismo y los materiales no fue en absoluto trivial: como se mencionó anteriormente, ser capaz de controlar la distribución de cargas para realizar una tarea útil es un problema muy difícil en la práctica, ya que la electricidad es, en general, un fenómeno fugaz, en comparación con, por ejemplo, la gravedad o la energía potencial en un resorte o una reacción química. Los materiales son neutros en condiciones normales, y determinar el comportamiento eléctrico fuera del equilibrio de un sistema requería de la excelente habilidad y la visión innovadora de estos pioneros.

Los primeros dispositivos electrónicos estuvieron involucrados en el desarrollo de las telecomunicaciones. Basándose en los trabajos de Francisco Salvá y Campillo en 1790 sobre el telégrafo eléctrico [13], Samuel Soemmerring en el verano de 1809 desarrolló un telégrafo electroquímico basado en la electrólisis del agua. El sistema estaba compuesto por 35 hilos conductores, uno por cada letra del alfabeto más los números del 0 al 9, conectados a una pila, que iban cada uno desde un cuadro con un selector de la letra correspondiente (transmisor)

a un electrodo en una especie de urna transparente llena del líquido (receptor) en donde se cerraba el circuito, provocando que desde cada letra seleccionada, marcada en la base de la urna, saliesen burbujas de gas motivadas por la descomposición del agua. De esta manera, se movía el selector para formar palabras, y en definitiva mensajes, que eran reproducidos al otro extremo de los hilos. Una importante extensión de estas ideas fue posible gracias a la comprensión de la naturaleza de la electricidad y el magnetismo, y en particular, al descubrimiento de la inducción magnética y a la invención del electroimán que permitían detectar y generar campos magnéticos, para transmitir información. Hacia mediados del siglo XIX, gracias al trabajo de Morse y otros, el telégrafo electromagnético había progresado hasta tal punto de convertirse en una aplicación comercial que permitía la conexión entre diferentes ciudades. El 24 de mayo de 1844, Morse hizo la primera demostración pública de su telégrafo enviando un mensaje desde la Cámara de la Corte Suprema en el Capitolio de EE.UU. en Washington a Baltimore [14].

Uno de los problemas que presentaban las primeras telecomunicaciones eléctricas era la pérdida de señal en las líneas de larga distancia. En 1835 Joseph Henry inventó el relé electromagnético [15]. Dado que el relé o “relevador” es capaz de controlar un circuito de salida de mayor potencia que el de

entrada, puede considerarse, en un amplio sentido, como un amplificador eléctrico. Como tal se emplearon en telegrafía, haciendo la función de repetidores que generaban una nueva señal con corriente procedente de pilas locales a partir de la señal débil recibida por la línea. Estos mismos dispositivos serían fundamentales en la conmutación de redes telefónicas. Estas funciones, amplificación y conmutación son dos de las principales funciones de los dispositivos electrónicos.

Ejemplos de otros dispositivos eléctricos que tendrían un gran impacto en la sociedad fue el motor eléctrico que empezó a ser desarrollado durante los trabajos pioneros de Faraday sobre electromagnetismo hacia 1820 y que sería mejorado durante el resto del siglo XIX hasta llegar a su forma actual a finales de ese siglo. El motor eléctrico transformó los procesos industriales y encontró una gran cantidad de aplicaciones domésticas. Otra importante aplicación que ha llegado a ser indispensable en la actualidad es la iluminación eléctrica, que emergió con la lámpara incandescente de Swan y Edison en 1880 [16].

A medida que el uso del telégrafo y la electricidad maduraban, se desarrollaron otros tipos de tecnologías de telecomunicación. En particular, el teléfono inventado por Bell en 1876 modificando un telégrafo eléctrico para transmitir información sonora mediante la transmisión de corrientes

inducidas electromagnéticamente [17]. Posteriormente, Tesla [18] y Marconi [19] en 1900 inventarían la radio, o telegrafía sin hilos, que llegaría a ser la forma de comunicación a larga distancia más utilizada en el siglo XX. Estas nuevas tecnologías propiciaron la aparición de nuevos desafíos y por lo tanto nuevos dispositivos electrónicos. Ejemplo de estos últimos es el micrófono de carbón inventado por Edison en 1877 [20] y mejorado por Hughes in 1878 [21] . En este dispositivo, la presión de las ondas sonoras modifica la resistencia de unas partículas de carbón contenidas en una membrana, convirtiendo así el sonido en una señal eléctrica. Los micrófonos de carbono se usaron también como amplificadores en los primeros repetidores de las redes telefónicas de larga distancia convirtiendo la señal entrante en una vibración mecánica mediante un receptor electromagnético que se acoplaba posteriormente a un micrófono para generar una señal más intensa.

La detección de la radiación electromagnética fue un elemento clave en el desarrollo de la tecnología de la radio. Modificando el diseño de lámpara incandescente de Edison, Fleming desarrolló el primer diodo o tubo de vacío de dos terminales, que podía detectar ondas de radio y rectificar señales, y que patentó en 1904, bajo el nombre de válvula de oscilación [22]. El diodo fue pronto seguido por un tubo de vacío de tres



terminales o triodo, y que supuso una revolución en la electrónica ya que permitió por primera vez “amplificar” señales débiles de una forma que antes no había sido posible. Entre otros avances, el triodo permitió la telefonía transoceánica al proporcionar repetidores fiables, la transmisión de radio y televisión, el desarrollo de la electrónica analógica, y los primeros computadores.

### **Los semiconductores**

Todos estos progresos y éxitos proporcionados por la electrónica en la primera mitad del siglo XX condujeron a una búsqueda continua de dispositivos con cada vez mejores prestaciones, una tendencia que continúa hasta la actualidad. A pesar de los éxitos y avances conseguidos por los dispositivos electrónicos hasta la primera mitad del siglo XX, los dispositivos de esta época eran muy simples, esencialmente válvulas de vacío, constituidas por electrodos metálicos en una carcasa de vidrio, y electroimanes, es decir, los dispositivos electrónicos estaban constituidos por conductores (cobre) y aislantes (vidrio). Sin embargo, en la segunda mitad del siglo XX, la electrónica pasó a estar dominada por un tercer material: los semiconductores, con los que se fabrican los modernos dispositivos electrónicos.

Desde el punto de vista de la conductividad, o facilidad para conducir la electricidad, es decir, permitir el movimiento de electrones a su través, los sólidos cristalinos se clasifican en aislantes (cuando no permiten el paso de la corriente) y conductores (cuando lo permiten). Desde este punto de vista, los semiconductores son meros aislantes, esto es, en estado puro y a temperatura ambiente, los semiconductores no dejan pasar la corriente. Sin embargo, son un tipo especial de aislantes. A diferencia del resto de aislantes o conductores, que tienen un valor definido de conductividad que apenas se modifica aún cuando cambie la temperatura, su composición o la influencia de campos eléctricos o magnéticos, los semiconductores pueden cambiar en varios ordenes de magnitud su conductividad simplemente modificando la temperatura, añadiendo determinadas impurezas en concentraciones de una parte por millón, o colocando el material bajo la influencia de la luz, radiación o campos eléctricos y magnéticos. De esta forma, combinando trozos de materiales semiconductores diferentemente contaminados, pueden crearse por ejemplo estructuras que amplifiquen las señales o que actúen como conmutadores; estas estructuras, en determinadas condiciones, se comportan como perfectos conductores, pero si se cambian las condiciones a nuestra voluntad, la misma estructura se comportará como un aislante

perfecto. En definitiva, una misma estructura semiconductor nos permite representar un estado “0” cuando no conduce, y un estado “1” cuando sí lo hace. ¿Y por qué es tan importante que la misma estructura muestra dos estados diferentes bien definidos, y convenientemente separados? Toda la información que conocemos, ya sea una imagen, este discurso, un texto, datos numéricos, pueden representarse usando un código binario. Es decir, usando dispositivos electrónicos contruidos a partir de semiconductores es posible codificar, almacenar, procesar y transmitir la información. De ahí la importancia de la Electrónica en la Tecnología de la Información.

A simple vista los sólidos semiconductores no son muy diferentes al resto de sólidos cristalinos. Sin embargo, gracias al entendimiento microscópico de la materia debido a los avances de la física y mecánica cuántica en la década de 1920 a 1930, se demostró que las propiedades de estos materiales eran altamente modificables, con un comportamiento que va desde un aislante perfecto hasta casi metálico. Con este nuevo grado de libertad junto con los avances en el procesado de materiales, se podía empezar a crear complejos dispositivos de estado sólido, sin partes móviles o tubos de vacío. Estos dispositivos podían ser más rápidos, más pequeños, más fiables, y consumían menos energía a la par que podían

realizar las mismas funciones de los dispositivos mecánicos y basados en tubos de vacío anteriores.

Una vez que la física de semiconductores y el procesado de materiales hubieron avanzado, la segunda mitad del siglo XX trajo consigo avances innovadores en la forma de dispositivos de estado sólido análogos al diodo y triodo. En particular, La demostración histórica del transistor bipolar en los laboratorios Bell en 1947 [14] se considera como el comienzo de la era moderna de la Electrónica y la Tecnología de la Información.

Durante muchos años el objetivo fue la modulación de la conductividad en un cristal semiconductor. El primer intento conocido de un artefacto cuya finalidad fuera la modulación de la conductividad en un trozo de semiconductor fue propuesto por el físico austrohúngaro Julius Edgar Lilienfeld en 1926 [24], mediante la aplicación de un campo eléctrico, de ahí el nombre de transistor de efecto campo, o Field-Effect Transistor (FET). Sin embargo, este primer transistor FET no era un diseño práctico y nunca llegó a implementarse. Posteriormente, el concepto de transistor de efecto campo fue reinterpretado teóricamente por Oskar Heil en la década de 1930 y William Shockley en la década de 1940 [25]. Pero todos los esfuerzos para fabricar un dispositivo que funcionara como la teoría predecía fueron un fracaso. De hecho, mientras trataban de modular la conductividad de un semiconductor,

dos miembros del equipo de investigación de Shockley, John Bardeen y Walter Brattain, lograron demostrar experimentalmente el transistor bipolar de unión [14] el 4 de Diciembre de 1947, lo que les valió el Premio Nobel en 1956 [17].

Dados los problemas prácticos para su obtención, los investigadores renunciaron en gran medida al concepto de transistor de efecto campo, y en su lugar se centraron en la tecnología bipolar que, aunque con transistores más voluminosos y complejos, dominó el desarrollo de los primeros circuitos electrónicos comerciales.

A finales de 1950, se produjo un gran avance con el trabajo del ingeniero egipcio Mohamed M. Atalla [8]. Atalla estudiaba las propiedades de la superficie del silicio en los Laboratorios Bell de New Jersey, donde inventó un nuevo método de fabricación de dispositivos semiconductores, recubriendo una oblea de silicio con una capa aislante de dióxido de silicio de espesor controlado, obtenido mediante un proceso de oxidación térmica a partir del propio silicio de la oblea. En noviembre de 1959, junto con el coreano Dawon Kahng, Mohamed Atalla fabricó con éxito el primer transistor FET funcional, el MOSFET o transistor de efecto campo Metal-Óxido-Semiconductor [28], [29], y que se convertiría posteriormente en la pieza clave de la tecnología electrónica actual, siendo el

artefacto más fabricado en la historia de la Humanidad con más de 13 sextillones de unidades.

### **El dominio “More Moore”**

Tras el establecimiento de dispositivos discretos de estado sólido, para algunos quedó claro que encontrar una forma efectiva de conectar o integrar estos dispositivos en circuitos grandes y complejos sería un factor importante en el progreso continuo de la Electrónica. Esto se hizo obvio al considerar que las computadoras de última generación alrededor de 1950, como ENIAC, que contenía decenas de miles de dispositivos discretos (en este caso tubos de vacío), tenían que almacenarse en grandes habitaciones y tenían un consumo de energía espectacular (160kW [11]).

A fines de la década de 1950, dos pioneros, Jack Kilby [31] de Texas Instruments y Robert Noyce [32] de Fairchild Semiconductor (más tarde cofundador de Intel), determinaron las ideas y procesos fundamentales que se utilizarían para integrar muchos dispositivos electrónicos y grandes circuitos en una sola pieza de cristal semiconductor. El circuito integrado resultante, fabricado utilizando silicio, es quizás el proceso tecnológico más importante inventado en la historia moderna.

En abril de 1960, Texas Instruments anunció el multivibrador 502 como el primer circuito integrado disponible en el mercado con un precio de 450 dólares por unidad. El esquema del 502 mostraba dos transistores, 4 diodos, 6 resistencias y 2 condensadores. El circuito integrado de Kilby demostró que era posible fabricar todos los elementos de un circuito electrónico en un único cristal semiconductor, pero el aislamiento entre dispositivos era tipo mesa (había que hacer cortes en el cristal de silicio entre dos componentes para aislarlos), y las conexiones entre los distintos dispositivos se hacía con alambres de oro. Al mismo tiempo Robert Noyce en Fairchild Semiconductors, usando dióxido de silicio como barrera a la difusión de contaminantes, introdujo el concepto de aislamiento por uniones semiconductoras de distinto dopado, y el proceso de la metalización, que permitía conectar unos dispositivos con otros mediante una finísima capa de metal depositada encima del cristal de silicio, pasivado con dióxido de silicio. Esto dio lugar a la tecnología planar del silicio, y a la creación del primer circuito integrado planar y monolítico.

Desde ese momento, la tecnología microelectrónica ha ido evolucionando siguiendo la llamada ley de Moore [24]. Gordon Moore, co-fundador de Intel, predijo en 1965 que el número de dispositivos en un circuito integrado se duplicaría

cada dos años. Desde entonces, no sabemos bien si porque Moore era realmente un profeta, bien porque la Industria Microelectrónica ha hecho todos los esfuerzos posibles, acelerando unas veces, ralentizando otras, para cumplir la predicción de Moore, lo cierto es que desde 1965, el número de transistores en un circuito integrado se ha duplicado cada dos años. Para entender la importancia de la Ley de Moore, y las cotas de integración que ha alcanzado la Industria Microelectrónica, Intel hace una analogía comparando transistores con personas [25]. En 1971 aparece el primer microprocesador integrado comercial, el 4004 [26]. Un microprocesador de 4 bits con un área de 13mm<sup>2</sup> y 2300 transistores. El año siguiente apareció el 8008, ya con 8 bits y 3300 transistores. 3000 personas podría ser el aforo de un gran teatro. Unos años después, en 1982, aparece el 80286, microprocesador de 16 bits, y con 130000 transistores, lo que, en términos de personas, sería la capacidad de un gran estadio de fútbol. En 1999, se lanza el Pentium III con 32 millones de transistores, lo que sería la población de la ciudad de Tokio. A partir del 2010, Intel introduce la familia “core i7”, con 1.170 millones de transistores en el Core i7 980x, es decir, la población de China. Pero lo realmente impactante, no es que sea posible introducir tal cantidad de transistores en un único cristal semiconductor, sino que el área que hoy en día ocupan



1000 millones de transistores, es la misma área que hace cuarenta años ocupaban 3000 transistores. Eso ha sido posible gracias a que las dimensiones de los transistores se han ido escalando, llegando actualmente a los nanómetros [36], esto es, la milmillonésima parte un metro, o lo que es lo mismo, el espesor de cada una de las partes resultantes al dividir la sección de un cabello humano en cien mil trozos iguales. El escalado de los dispositivos electrónicos ha sido muy importante a lo largo de los años, no sólo porque permite introducir un mayor número de transistores por área de silicio, sino también, porque intrínsecamente, al hacer más pequeño el dispositivo, éste se comporta mejor, es más rápido y consume menos energía, y es más barato; tal es así, que la máxima que “gobierna” la vida del ingeniero electrónico es la famosa “PPAC”: power-performance-area-cost, es decir, menor potencia consumida, mayores prestaciones, menor área y menor coste.

Gracias a la tecnología del silicio, y al escalado de los dispositivos electrónicos, ha sido posible desarrollar herramientas con una gran potencia de cálculo, y un gran poder de almacenamiento, como la que necesitan las granjas de servidores de Google para proporcionar un servicio de búsqueda rápido y fiable, o el supercomputador SUMMIT, con

200 mil billones de operaciones por segundo (petaflops,  $10^{15}$ ) [27].

¡Pero esto ya no es suficiente hoy en día! Porque toda esta potencia de cálculo y capacidad de almacenamiento la necesitamos en sistemas portátiles y embebida en todo lo que nos rodea: en nuestro teléfono inteligente, en nuestro Smart-TV, en el frigorífico, en nuestro coche, .... Sólo por dar un ejemplo: una videoconsola PlayStation 4s actual alcanza 1,84 teraflops ( $10^{12}$ ), es decir, 150 veces la potencia de cálculo de Deep Blue, la supercomputadora de IBM que en 1997 ganó al campeón mundial de ajedrez Gary Kasparov [28]. Mayor potencia de cálculo, y mayor poder de almacenamiento, es lo que se ha venido en llamar el dominio “More Moore”.

### **El dominio “More than Moore”**

Toda esta potencia de cálculo que proporciona el dominio More Moore pese a ser muy importante y necesaria, no es suficiente. Una persona muy inteligente, con un cerebro privilegiado, capaz de realizar mentalmente miles de operaciones y recordar millones de datos, no sería útil si no dispusiera de sentidos que le permitan adquirir esos datos, adquirir información para procesar, y si no tuviera brazos, manos y piernas, o boca para poder actuar, ejecutar y comunicar las decisiones adoptadas por su cerebro. Es decir,

necesitamos que nuestros sistemas además de ser inteligentes, capten información del exterior (sean sensitivos) y den respuesta a esos estímulos (sean responsivos). Es lo que se ha venido en llamar el dominio “More than Moore”, es decir, añadir nuevas funcionalidades a los sistemas electrónicos. Se necesitan por tanto nuevos dispositivos capaces de detectar señales de diferente topología, sensores y biosensores fiables y con umbrales de detección muy bajos; dispositivos capaces de recoger energía del entorno (energy harversting) y utilizarla para su propio funcionamiento, y/o almacenarla en forma útil para otros sistemas; dispositivos incorporables en sustratos flexibles, como, por ejemplo, en textiles; electrodos transparentes, y un largo etcétera. Pero lo más importante de todo, es que todas estas aplicaciones, sean muy baratas y no sólo desde el punto de vista económico, sino también desde el punto de vista energético. Para ello es necesario en la actualidad una verdadera revolución, la introducción de nuevos conceptos disruptivos de dispositivos electrónicos en los que se optimice el consumo de potencia y que podría suponer una revolución comparable a la introducción del transistor de estado sólido en 1947. Me refiero a dispositivos cuánticos, circuitos neuromórficos, la lógica sub-umbral, pero también nuevos conceptos de computación, más allá de la

arquitectura de Von Neumann en la que se basan los computadores actuales.

La implantación de la Inteligencia Artificial y del Internet de las cosas, requiere una serie de condiciones para las que no estamos preparados, y que demanda una gran inversión de medios y de talento en muchas facetas y disciplinas a corto y medio plazo. Quizás lo más vistoso, lo más notorio de la Inteligencia Artificial sean sus aplicaciones, pero no es ni lo único, y si me apuran, ni lo más importante. Para que las aplicaciones, algoritmos de decisión que se están ya desarrollando, e incluso imaginando, puedan ponerse en práctica necesitamos una infraestructura que no tenemos. Es necesario desplegar un “ejercito” de sensores de ultra-bajo consumo por doquier, es necesario disponer de conexiones a Internet rápidas y fiables desde cualquier punto del planeta, necesitamos computación en la nube, algoritmos eficientes de “minería de datos”, herramientas y técnicas de seguridad tanto pasiva como activa y gran capacidad de almacenamiento en la nube. E insisto, todo ello muy barato, económica y energéticamente. ¿Por qué es importante el coste de los dispositivos? El éxito de la implantación de la Inteligencia Artificial pasa por su amplio despliegue, es decir, porque todo el mundo la utilice. Pongo un ejemplo. Todos conocen, estoy seguro, la aplicación de Google Maps para saber el estado del

tráfico. Para ello, Google controla a través del GPS de nuestros teléfonos móviles nuestra posición en las carreteras y la velocidad a la que nos movemos. De esa forma conoce si hay más o menos automóviles y si estos se mueven de manera fluida o no. Por lo tanto, lo que se necesita es que todo vehículo presente en la red viaria disponga de un teléfono móvil conectado, y para ello es necesario que los teléfonos inteligentes sean económicamente accesibles a la población. Algo parecido ocurrirá con el resto de las aplicaciones.

En definitiva, se abre ante nosotros un futuro apasionante, lleno de desafíos en muchas disciplinas, y como decía antes, hará falta un gran esfuerzo económico, pero también de talento, porque algunas de las soluciones a estos desafíos pueden ser conocidas, o al menos vislumbradas, pero en otros campos, el camino a seguir es, hoy por hoy, una verdadera incógnita, como, por ejemplo, cómo reducir la potencia consumida por los dispositivos y circuitos electrónicos.

¿Significa esto el fin de la Era del Silicio? Ni mucho menos. El silicio vino para quedarse. El silicio es un material muy abundante en la corteza terrestre y por lo tanto barato, del que se conoce todo o casi todo tanto a nivel teórico como tecnológico. El silicio ha demostrado ser un material excelente, versátil, muy resistente y fiable. Su óxido, el óxido de silicio, se obtiene fácilmente por oxidación térmica del

propio silicio, y resulta ser también un material estable, aislante eléctricamente y que actúa como barrera al paso de impurezas. Además, usando silicio, se saben hacer hoy en día aplicaciones, circuitos, dispositivos con unas prestaciones inimaginables hace unos años. Toda esta potencia y/o capacidad no puede desperdiciarse. Por lo tanto, el silicio estará siempre ahí. Hay otros materiales que en teoría podrían presentar puntualmente mejores prestaciones que el silicio. Existen otros semiconductores que son mejores electrónicamente que el silicio, y que podrían desarrollar aplicaciones que serían imposibles con silicio. Por lo tanto, lo que realmente tiene sentido es la co-integración de la tecnología del silicio con estos otros materiales. Es decir, la implementación monolítica en un solo circuito integrado de un sistema en las que unas tareas se realicen sobre circuitos de silicio, y otras tareas sobre circuitos de otros materiales semiconductores que presenten mejores prestaciones para esas tareas, que el propio silicio. Y esta ha sido la apuesta del Laboratorio Singular de Nanoelectrónica, Grafeno y Materiales Bidimensionales de la Universidad de Granada del que formo parte.

## **La revolución de los materiales bidimensionales**

El grafeno junto con otros semiconductores bidimensionales, es uno de estos materiales que para determinadas aplicaciones presenta mejores prestaciones que el silicio. El grafeno está formado por una lámina monoatómica bidimensional de átomos de carbono dispuestos en una red hexagonal en la que cada átomo de carbono ocupa un vértice de la red. Esta distribución atómica le confiere unas propiedades mecánicas, eléctricas, térmicas y ópticas espectaculares, siendo el material más fuerte conocido, pero extremadamente ligero con una densidad superficial de sólo 0.763mg por metro cuadrado. El carbono es el tercer material más abundante en el Universo sólo detrás del hidrogeno y el helio. En la corteza terrestre el carbono cristalino se encuentra en dos formas alótropas, el diamante y el grafito, materiales químicamente idénticos, pero con propiedades macroscópicas muy diferentes que les confiere la naturaleza de los enlaces químicos. El diamante, el material sólido más duro en la escala de Mohs, une sus átomos de carbono mediante enlaces covalentes en todas las direcciones del espacio. En cambio, el grafito, une sus átomos covalentemente únicamente en planos, mientras que los planos se unen unos con otros en la tercera dimensión mediante fuerzas de Van der Waals, mucho más débiles. De ahí que el grafito presente la propiedad de la exfoliación, separación de

planos del material mediante la aplicación de una pequeña presión. De hecho, el grafeno no es más que una de estas capas bidimensionales de las que está constituido el grafito.

Aunque se ha teorizado acerca del grafeno desde los años 50 [39], la primera vez que se consiguió aislar en un laboratorio fue en Manchester [30], lo que les valió a Andrei Geim y Konstantin Novoselov el Premio Nobel de Física en 2010. Para obtener grafeno se pueden utilizar diferentes métodos. Los más directos son los que lo obtienen del grafito mediante la exfoliación química, mecánica o térmica [31]. También se pueden obtener mediante la descomposición a altas temperaturas de fuentes de carbono como el metano, el acetileno o el pentano, y la disolución del carbono resultante en láminas delgadas metálicas como el cobre o el níquel que actúan como catalizadores [42]. Todas estas técnicas están disponibles en nuestro Laboratorio [43], [44], [45].

Las aplicaciones del grafeno no solo abarcan el campo de la electrónica, sino también otras muchas disciplinas, como la ingeniería de materiales, donde se aprovecha su dureza y resistencia a la vez que su ligereza para la fabricación de nuevos materiales compuestos con una altísima relación resistencia mecánica / peso, lo que resulta especialmente útil en la fabricación de componentes en la industria automovilística, o en la aeronáutica, o en la edificación.



Otra de las aplicaciones potenciales del grafeno es la desalinización y depuración de aguas. Posiblemente, la disponibilidad de fuentes de agua potable y apta para el consumo humano es una de las preocupaciones más importantes de muchas poblaciones en todo el mundo. Pues bien, frente a los sistemas tradicionales de depuración o desalinización de aguas basados en la ósmosis inversa, que son excesivamente caros y difíciles de aplicar para la producción masiva de agua potable, existe la posibilidad del empleo de un novedoso sistema cuyo componente principal es el grafeno, concretamente en forma de láminas de grafeno perforadas.

Los recubrimientos protectores son otra de las aplicaciones no electrónicas del grafeno. El grafeno es inerte químicamente, es decir, no reacciona con el oxígeno del aire, ni se oxida, lo que garantiza su gran durabilidad. Esta propiedad hace que se esté empleando para fabricar ciertos compuestos para usarlos como recubrimientos que protejan los metales contra la corrosión y la oxidación con la misma eficiencia que los recubrimientos tradicionales de base orgánica, con la diferencia de que éstos últimos necesitan una capa de aplicación 5 veces más gruesa que los recubrimientos de base de grafeno.

Debido a la excelente conductividad térmica que presenta el grafeno, mejor que la de cualquier otro material conocido, permite que pueda ser empleado con gran eficiencia como

material para la fabricación de disipadores de calor. Uno de los sectores donde es imprescindible disponer de un sistema de refrigeración eficiente es precisamente en la electrónica. Cada vez se fabrican dispositivos electrónicos más potentes que necesitan de una refrigeración adecuada para garantizar su máxima durabilidad y rendimiento. Además, en el mundo de la electrónica los componentes que se empleen deberán ser también muy ligeros, que desempeñen su función ocupando el mínimo espacio necesario. En este sentido, si hay algún material que reúna estos requisitos (poco peso, durabilidad y excelente conductividad térmica) es el grafeno, por lo que se está empezando a usar también como material para la fabricación de disipadores térmicos en dispositivos electrónicos.

Decíamos anteriormente que uno de los desafíos que debe afrontar la Electrónica en el futuro es el del aprovechamiento y almacenamiento de la energía del entorno. En el mundo actual, donde el uso de las energías renovables cada vez tiene mayor importancia, el almacenamiento de la energía es el cuello de botella que puede limitar la implantación más generalizada de estas energías menos contaminantes. Un ejemplo claro se tiene en el desarrollo del coche eléctrico, donde el tamaño de las baterías y su peso condiciona mucho la autonomía del vehículo. Una posible solución al empleo de las baterías

convencionales basadas en reacciones químicas, es el uso de condensadores. Un condensador es un dispositivo eléctrico que puede almacenar carga eléctrica en sus placas sin necesidad de reacciones químicas. Los condensadores tienen la ventaja de conseguir una carga casi inmediata, y de aguantar un número de ciclos de carga y descarga ilimitado. El problema radica en que, a igualdad de peso, la capacidad de almacenamiento de un condensador representa tan sólo un 5% de la capacidad de almacenamiento que podría ofrecer una batería. Una solución donde actualmente se trabaja es en la fabricación de nuevos supercondensadores basados en el grafeno. Como se sabe la capacidad de almacenamiento de un condensador depende en gran medida del área de las placas que lo conforman, es decir, a mayor área de placas mayor capacidad, pero también mayor peso del dispositivo. Sin embargo, si se emplean nuevos materiales más ligeros y que a la vez sean buenos conductores, se podría conseguir mejorar la relación superficie de placa / peso del condensador. Y aquí es donde el grafeno tiene su oportunidad. El grafeno es un superconductor de la electricidad y muy ligero de peso, que ofrece una gran superficie específica (alrededor de 2675 m<sup>2</sup>/g), lo que permitiría fabricar capas para condensadores muchísimo más ligeras y de mayor tamaño, lo que aumentaría

la capacidad de almacenamiento de energía del condensador sin necesidad de aumentar en exceso su peso.

Gracias a sus excelentes propiedades de conductividad eléctrica, flexibilidad y transparencia, el grafeno se está incorporando en la fabricación de pantallas táctiles flexibles para dispositivos electrónicos, resultando pantallas de una vida útil casi ilimitada y a un costo de fabricación muy competitivo. Desarrollando esta idea, ya se están fabricando displays electroforéticos, teléfonos móviles y ordenadores totalmente flexibles que se pueden enrollar como si fuera una hoja de papel.

Otras de las aplicaciones del grafeno es su uso en la fabricación de sensores de alta sensibilidad, que puedan servir para la fabricación de sistemas y dispositivos de detección de gases y biosensores, etc.. Una de las líneas de trabajo que actualmente desarrolla nuestro grupo es el proyecto “GIVEME\_5: Cinco minutos y cincuenta céntimos para el diagnóstico precoz del cáncer”.

Todas estas aplicaciones junto con la co-integración de los materiales bidimensionales con silicio están siendo actualmente desarrolladas en el Laboratorio de Nanoelectrónica, Grafeno y Materiales Bidimensionales de la Universidad de Granada. Fundado en 2008, este Laboratorio está dotado con el equipamiento e infraestructuras que lo

hacen uno de los más avanzados de Europa en su especialidad, con una inversión que ha superado los 6 millones de euros en los últimos diez años.

### **¿Pero cómo he llegado hasta aquí?**

Mis primeros contactos con la investigación no fueron precisamente en el campo de la Electrónica, sino el Electromagnetismo. Cursando tercer curso de Ciencias Físicas, a las que por cierto llegué por casualidad, el Prof. Safwan al Khouri Ibrahim allá por 1989 me propuso solicitar una beca de colaboración para trabajar con él, el año siguiente. Desgraciadamente, el Prof. Ibrahim fallece de forma repentina justo antes de iniciar el nuevo curso académico, de manera que me encuentro con mi beca, pero sin un tutor. La única persona que conocía en el Grupo de Electromagnetismo era el Prof. Juan Antonio Morente Chiquero, que había sido mi profesor de Electricidad y Magnetismo el año anterior. Juan Antonio, a quien debo mucho y del que tengo un gran recuerdo, era una persona excelente y generosa, y muy directa. Juan Antonio, con su trato llano y lejos de formalismos, me dijo que mi misión era terminar mis estudios de Física con las mejores calificaciones posibles, y que ya tendría tiempo de hacer Investigación o cualquier otra cosa. De hecho, terminados mis estudios volví al despacho de Juan Antonio.

Por aquel entonces, el Prof. López Villanueva del Departamento de Electrónica me había insinuado la posibilidad de solicitar una beca de Investigación en el Grupo del Prof. Pedro Cartujo. Pero yo tenía un compromiso con Juan Antonio Morente. Una vez en su despacho, Juan Antonio con su forma directa y sin tapujos, como él era, me dijo que estaría encantado de dirigirme una Tesis Doctoral, pero que mi futuro sería más prometedor en el Departamento de Electrónica, puesto que se acababan de inaugurar los estudios de Informática, y allí tendría mucho más fácil conseguir una plaza de profesor y promocionar. Siguiendo el consejo de Juan Antonio, al que como digo estaré siempre agradecido, acepté la oferta del Profesor Juan Antonio López Villanueva y del Prof. Pedro Cartujo, y así inicié mis primeros juegos con los electrones. Mi tesis doctoral se desarrolló en la simulación de dispositivos electrónicos por el Método de Monte Carlo. En aquel tiempo, la simulación de dispositivos electrónicos era un tema caliente en la esfera internacional. Además, no necesitaba una gran inversión: un ordenador, un manual de Fortran, y mucho mucho estudio. La tecnología electrónica había alcanzado ya unas cotas de desarrollo importantes, incluso se empezaban a afrontar las primeras limitaciones físicas como consecuencia del escalado de los dispositivos, y era imprescindible para seguir avanzando, conocer

microscópicamente qué ocurría dentro de los dispositivos, es decir, cómo se mueven los electrones en el interior del dispositivo, para de esa forma, poder hacer un diseño óptimo y una utilización eficiente de los mismos. El trabajar en un tema candente me permitió en muy corto plazo de tiempo conseguir publicaciones de impacto en revistas de prestigio, asistir a las conferencias internacionales más importantes en el campo, y hacernos un nombre a nivel internacional. Esto nos permitió participar en varios proyectos internacionales, y aprender de los mejores expertos mundiales en Simulación de Dispositivos, como el Dr. Massimo Fischetti del IBM TJ Watson Research Center en Nueva York [46], [47], y del Prof. Sigfried Selberherr en la Technical University of Vienna [48], [49], donde realicé varias estancias, o el Prof. Lino Regianni de la Universidad de Módena, uno de los padres del Método de Monte Carlo, y que fue miembro de mi tribunal de tesis.

A principios del año 2000, tras mi vuelta de Estados Unidos, surgió una oportunidad que marcó el devenir de mi investigación en los años siguientes. El Prof. Sorin Cristoloveanu del IMEP en Grenoble, padre de la tecnología de Silicio sobre Aislante, me propuso organizar en Granada una reunión europea para discutir el futuro de la tecnología de Silicio. Aquella reunión se celebró en la Facultad de Ciencias el 26 y 27 de octubre de 2000. De aquella reunión, a la que

asistieron los principales investigadores europeos del campo, tanto de universidades, centros de investigación e industria, nació el germen de la red europea EUROSUI, de los proyectos europeos EUROSUI y EUROSUI+, de los que he sido coordinador, y de la serie de conferencias EUROSUI-ULIS que ha reunido año tras año, desde el año 2001 hasta la actualidad, a los principales actores europeos en el campo de los dispositivos electrónicos. La relación con el Prof. Cristoloveanu se ha mantenido desde entonces. Durante este tiempo, tres miembros de nuestro grupo de investigación, dos de ellos hoy profesores de nuestra Universidad, han obtenido el título de doctor por la Universidad de Grenoble, el “Silicon Valley Europeo”, y han tenido el privilegio de contar con el Prof. Cristoloveanu como su director de tesis. Las publicaciones conjuntas entre miembros de la Universidad de Granada y el Prof. Cristoloveanu se cuentan por más de medio centenar. Hemos trabajado conjuntamente en 6 proyectos europeos de los diez en los que mi grupo de investigación ha participado hasta la fecha. Ha propiciado la firma de varios acuerdos de colaboración entre la Universidad de Grenoble y la Universidad de Granada (Memorandum of Understanding) para apoyar los estudios de doctorado en Ingeniería Electrónica (acuerdos de co-tutela INPG-UGR) y la solicitud del Campus de Excelencia Internacional BIOTIC de nuestra



Universidad. El Prof. Cristoloveanu es responsable directo de que contemos en nuestra Universidad, en el Centro de Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones, CITIC, con uno de los laboratorios y salas limpias de Nanoelectrónica más avanzadas de Europa: el ya mencionado laboratorio singular de Nanoelectrónica, Grafeno y Materiales Bidimensionales. Él nos ha alentado a dar este paso, y nos ha asesorado y ayudado en la configuración del equipamiento allí instalado, y que supone un orgullo para nuestra Universidad. Recientemente, la Junta de Gobierno de nuestra Universidad, en reconocimiento, ha nominado al Prof. Cristoloveanu como doctor Honoris Causa por la Universidad de Granada, por su trayectoria científica, su relación con la Universidad de Granada y su talla personal.

El Prof. Cristoloveanu ayudó también a la internacionalización de nuestro Laboratorio, hoy “hermanado” con grupos de investigación de todo el mundo, incluyendo Europa, Estados Unidos, Japón, Taiwán, Corea del Sur y Australia.

En estos más de treinta años de relación con la Universidad, he aprendido muchas cosas relacionadas con la Ciencia, por supuesto. Pero también he aprendido muchas cosas de las personas. Porque el científico antes que científico es persona. Y no se puede ser buen científico si antes no se es buena persona. El científico tiene que ser generoso y honesto, tiene

que ser leal, y sobre todo, tiene que ser agradecido. La generosidad y la honestidad está en el ADN del hombre de Ciencia. Decía Charles Kittel, en su libro *Mechanics* [50] “que los grandes descubrimientos de la Ciencia experimental fueron logrados por hombres y mujeres de todo tipo: pacientes, persistentes, intuitivos, inventivos, energéticos, y también perezosos. Pero todos ellos tenían dos cosas en común: eran honestos y realmente observaron lo que habían anotado, y publicaron los resultados de su trabajo en una forma que permitía a otros duplicar sus experimentos y observaciones”. Los índices de impacto, las citas, el número de publicaciones, todo esto, no es Ciencia, ni ayuda a hacerla. Todos estos “ruidos”, toda esta ansiedad de publicar por publicar, en revistas con tal o cual índice, hacen que el científico pierda su esencia. No digo que no se publique. Por supuesto. El objetivo del científico es dar a conocer su investigación. Lo que digo es que la publicación es el medio y no el fin.

El científico tiene que ser leal consigo mismo, y con sus compañeros, en el sentido más amplio de la palabra. Raramente, los grandes hallazgos, resultados, y teorías científicas surgen de una inspiración divina. La ciencia surge de la observación continuada y colectiva de los fenómenos que nos rodean. La ciencia surge de compartir con la comunidad científica nuestros hallazgos, hipótesis, y teorías, y de la

discusión y puesta en común de las mismas. Y la ciencia surge de estudiar con ahínco los resultados y teorías de nuestros antecesores. Por supuesto que la Historia de la Ciencia está llena de mentes privilegiadas, científicos prodigiosos, que han obtenido resultados espectaculares y han contribuido con su trabajo a crear un antes y un después de ellos. Pero incluso ellos, han aprendido, se han formado y han sido ayudados y promocionados por otros. Y es justo reconocer ante la Comunidad en qué me he basado para llegar a tal o cual resultado y quién me ha ayudado a llegar donde estoy. Cuando echo la vista atrás, veo que hoy en día cada vez más, nos vemos envueltos en una dinámica en la que se olvidan estos principios, y no nos importa pasar por encima de nadie, incluso de aquel que un día nos ayudó a levantarnos.

Y decía que el científico tiene que ser agradecido. Y esto último es algo que he intentado cumplir día a día, quizás porque fue uno de los consejos que mi padre, al que perdí hace ya mucho tiempo, me dio incluso mucho antes de dedicarme a la Ciencia. Agradecer es reconocer que alguien ha hecho algo por ti, es reconocer que en un momento le has importado a alguien. ¿Hay algo más bonito para un ser humano? Agradecer es reconocer que alguien te ha dado algo que tú nunca podrás devolverle, como su tiempo o sus conocimientos.

Se dice que la vida es como un viaje en tren, con sus estaciones, sus vagones, y personas que suben y bajan, y en determinados momentos se sientan a tu lado y comparten parte de su viaje. En estos treinta años de mi vida científica, son muchos los pasajeros con los que he compartido viaje. Y a muchos de ellos tengo que agradecer mucho. Y aunque el agradecimiento es un acto privado, de persona a persona, sí que, llegado a este punto me gustaría agradecer públicamente a algunas personas que algún día pensaron en mí. Al Prof. Juan Antonio López Villanueva, mi director de Tesis, actual director del Departamento de Electrónica y Tecnología de Computadores. Juan Antonio puso en mí la semilla de la investigación, y me dio mi primer tema para investigar: El método de Monte Carlo para la simulación de dispositivos electrónicos, y fue mi valedor y soporte en las primeras etapas de mi carrera. A Don Pedro Cartujo Estébanez. Para mí Don Pedro fue la figura amable que desde la sabiduría que dan los años supo aconsejarme para bien mientras estuvo entre nosotros. Hasta el último día. A Juan Enrique Carceller Beltrán por su confianza a lo largo de todos estos años, y su apoyo incondicional en todas las iniciativas que emprendí hasta que fui autosuficiente. A Jesús Banqueri Ozáez que fue mi primer compañero de fatigas, el testigo de los primeros resultados de mi trabajo y con el que compartí mis primeras

experiencias científicas, pero también humanas en la Facultad. Al resto de miembros del Departamento de Electrónica y Tecnología de Computadores, compañeros de viaje.

A ~~Mari Carmen Carrión~~ María Dolores Suarez Ortega, Vicerrectora de Investigación. Recuerdo con cariño la primera visita que hice a María Dolores, recién nombrada Vicerrectora de Investigación a su despacho. MLola, a quién no conocía de nada, y creo que ella a mí tampoco, me dijo: “Tu tira, que estoy aquí para ayudarte”. Y así fue mientras estuvo en el cargo.

Al actual Vicerrector, Prof. Enrique Herrera y su equipo del Vicerrectorado de Investigación, donde siempre tenemos las puertas abiertas. A nuestra Rectora, Prof. Pilar Aranda, que ha creído desde el principio en este proyecto, ha confiado en nosotros, nos ha apoyado y lo sigue haciendo.

A ~~Mari Carmen Carrión~~ Mari Carmen Carrión, nuestra decana, que, aunque no tuve la suerte de que fuera mi profesora en la carrera, sí que lo ha sido en algunos pasajes de mi vida.

Mención especial merecen mis alumnos. Algunos por unas razones u otras ya no trabajan conmigo. Se han independizado como yo hice en su momento. Es ley de vida. Pero otros han elegido seguir a mi lado. Gracias. Gracias por estar ahí, gracias por seguir ahí. Para un profesor no hay más satisfacción que ver cómo tus alumnos te superan, saben más que tú y llegan donde tú no has sido capaz. Nadie hace nada sólo. Está

equivocado el que piense lo contrario. Gracias a Carlos Sampedro, Luca Donetti, José Luis Padilla, Carlos Navarro, Carlos Márquez, Cristina Medina, Norberto Salazar, Santiago Navarro, y José Carlos Galdón. Si hemos conseguido algo, ha sido por vosotros.

Y porque siempre dejamos para el final lo más importante, también debo un agradecimiento a mi familia. Mi mujer Elena, mis hijos Borja y Elena, por su apoyo y comprensión. Porque sé que es muy difícil vivir con un científico.

A mi madre, Paquita, y a mis hermanos María Dolores, Mari Luz y Jorge, hoy aquí presentes. Y por supuesto, a mi padre, que dondequiera que esté, estará hoy orgulloso.

Muchas gracias.

## **Bibliografía**

- [1] Voldman, S.H., «A review of electrostatic discharge (ESD) in advanced semiconductor technology.,» *Microelectronics Reliability*, vol. 44, nº 1, pp. 33-46, 2004.
- [2] Chapman, S., «William Gilbert and the science of his time,» *Nature*, vol. 154, pp. 132-136, 1944.
- [3] Ashton, T. S., *The industrial revolution (1760-1830)*, Oxford, U.K.: Oxford University Press Catalogue, 1948, 1997.
- [4] Maxwell, J.C., «A dynamical theory of the electromagnetic field.,» *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. 13, pp. 531-536., 1864.
- [5] Volta, A., «On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different species,» *Philosophical Transactions Royal Society*, vol. 90, pp. 403-431, 1800.
- [6] Seebeck, T. J., «Ueber die magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperaturdifferenz.[Magnetic polarization of metals and ores by temperature differences].,» *Abhandlungen der K. Akad. der Wissenschaften zu Berlin*, vol. 82, pp. 265-373, 1826.
- [7] Ohm, G.S., «Vorläufige Anzeige des Gesetzes, nach welchem Metalle die Kontaktelektricität leiten.,» *Annalen der Physik*, vol. 80, nº 5, pp. 79-88, 1825.

- [8] Gupta, M. S., «Georg Simon Ohm and Ohm's Law.,» IEEE Transactions on Education, vol. 23, n° 3, pp. 156-162, 1980.
- [9] Joule, J. P., «On the heat evolved by metallic conductors of electricity, and in the cells of a battery during electrolysis.,» The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, vol. 19, n° 124, pp. 260-277, 1841.
- [10] Thomson, J.J., «Cathode rays,» The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, vol. 44, n° 269, pp. 293-316, 1897.
- [11] Millikan, Robert Andrews, The Electron: Its Isolation and Measurements and the Determination of Some of its Properties., The University of Chicago Press., 1917.
- [12] Ashcroft, N.W.; Mermin, N.D., Solid state physics, Philadelphia: Saunders College, 1976.
- [13] Salvá y Campillo, Francisco, «Memoria sobre la Electricidad Aplicada a la Telegrafía,» Memorias de la Real Academia de Ciencias Naturales y Artes de Barcelona, pp. 1-12, 1876.
- [14] Prescott, George Bartlett., History, theory, and practice of the electric telegraph., Boston: Frank Jones, 1866.
- [15] Gurevich, V., Electric relays: Principles and applications, CRC Press, 2018.



- [16] T. Edison, «Electric lamp. 27 Ene. 1880.». Estados Unidos Patente U.S. Patent No 223,898, 27 January 1880.
- [17] A. G. Bell, «Improvement in telegraphy.». Estados Unidos Patente U.S. Patent No 174,465, 7 March 1876.
- [18] N. Tesla, «System of transmission of electrical energy». Estados Unidos Patente U.S. Patent No 645,576, 20 March 1900.
- [19] G. Marconi, «Wireless telegraphy». Estados Unidos Patente U.S. Patent No 786,132, 28 March 1905.
- [20] T. A. Edison, «Improvement in speaking-telephone». Estados Unidos Patente U.S. Patent No 203,016, 30 April 1878.
- [21] Marsh, J.O.; Roberts, R. G., «David Edward Hughes: inventor, engineer and scientist.» Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. IET Digital Library, pp. 929-935, 1979.
- [22] J. Fleming, «Instrument for converting alternating electric currents into continuous currents.». Estados Unidos Patente U.S. Patent 803,684, 7 Nov 1905.
- [23] J. Bardeen y W. H. Bratain, «Three-electrode circuit element utilizing semiconductive materials». Estados Unidos Patente U.S. Patent No. 2,524,035, 3 Oct 1950.

- [24] J. Lilienfeld, «Method and apparatus for controlling electric currents». Estados Unidos Patente U.S. Patent 1,745,175A, 08 10 1926.
- [25] Sah, C.T., «Evolution of the MOS transistor-from conception to VLSI.» Proceedings of the IEEE, vol. 76, n° 10, pp. 1280-1326, 1988.
- [26] John Bardeen, «Semiconductor research leading to the pointcontact transistor.» Nobel Lecture, 1956.
- [27] Atalla, M. M., Tannenbaum, E., & Scheibner, E. J., «Stabilization of Silicon Surfaces by Thermally Grown Oxides.» Bell System Technical Journal, vol. 38, n° 3, pp. 749-783, 1959.
- [28] K. Dawon, «Electric field controlled semiconductor device.» Estados Unidos Patente U.S. Patent No 3,102,230,, 27 August 1963.
- [29] M. M. Atalla, «Semiconductor devices having dielectric coatings.» Estados Unidos Patente U.S. Patent No 3,206,670, 14 September 1965.
- [30] «ENIAC: Electronic Numerical Integrator And Computer.» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/ENIAC>.
- [31] J. Kilby, «Miniaturized electronic circuits.» Estados Unidos Patente U.S. Patent No 3,138,743, 23 June 1964.

[32] R. Noyce, «Semiconductor circuit complex having isolation means». Estados Unidos Patente U.S. Patent No 3,150,299, 22 September 1964.

[33] Moore, Gordon E., «Cramming more components onto integrated circuits,» *Electronics*, vol. 38, n° 8, p. 114, 1965.

[34] «Moore's Law: The Patterns of Progress,» [En línea]. Available: <https://www.computersciencezone.org/moores-law/>.

[35] «The Story of the Intel® 4004: Intel's First Microprocessor,» [En línea]. Available: <https://www.intel.com/content/www/us/en/history/museum-story-of-intel-4004.html>.

[36] Navarro, C., Karg, S., Marquez, C., Navarro, S., Convertino, C., Zota, Gamiz, F. (2019), «Capacitor-less dynamic random access memory based on a III–V transistor with a gate length of 14 nm,» *Nature Electronics*, vol. 2, n° 9, pp. 412-419, 2019.

[37] « Summit Oak Ridge National Laboratory's: 200 petaflop supercomputer,» [En línea]. Available: <https://www.olcf.ornl.gov/olcf-resources/compute-systems/summit/>.

[38] «Deep Blue,» [En línea]. Available: <https://www.ibm.com/ibm/history/ibm100/us/en/icons/deepblue/>.

- [39] Wallace, P.R., «The band theory of graphite.,» *Physical review*, vol. 71, n° 9, p. 622, 1947.
- [40] Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., ... & Firsov, A. A., «Electric field effect in atomically thin carbon films,» *Science*, vol. 306, n° 5696, pp. 666-669, 2004.
- [41] Zhu, Y., Murali, S., Cai, W., Li, X., Suk, J. W., Potts, J. R., & Ruoff, R. S., «raphene and graphene oxide: synthesis, properties, and applications.,» *Advanced materials*, vol. 22 , n° 35, pp. 3906-3924, 2010.
- [42] Zhang, Y. I.; Zhang, L.; Zhou, C., «Review of chemical vapor deposition of graphene and related applications.,» *Accounts of chemical research*, vol. 46, n° 10, pp. 2329-2339, 2013.
- [43] Rodriguez, N., Ruiz, R. J., Marquez, C., & Gamiz, F., «Scribing graphene circuits,» de *Future Trends in Microelectronics: Journey Into the Unknown.*, John Wiley & Sons, 2016, pp. 207-216.
- [44] Marquez, C., Rodriguez, N., Ruiz, R., & Gamiz, F., «Electrical characterization and conductivity optimization of laser reduced graphene oxide on insulator using point-contact methods» *Rsc Advances*, vol. 6, n° 52, pp. 46231-46237, 2016.

- [45] Biel, B., Donetti, L., Ortiz, E. R., Godoy, A., & Gámiz, F., «Tunability of effective masses on MoS<sub>2</sub> monolayers.,» *Microelectronic Engineering*, vol. 147, pp. 302-305, 2015.
- [46] Fischetti, M. V., Gamiz, F., & Hänsch, W., «On the enhanced electron mobility in strained-silicon inversion layers.,» *Journal of Applied Physics*, vol. 92, n° 12, pp. 7320-7324, 2002.
- [47] Gamiz, F., & Fischetti, M. V., «Monte Carlo simulation of double-gate silicon-on-insulator inversion layers: The role of volume inversion.,» *Journal of Applied Physics*, vol. 89, n° 10, pp. 5478-5487, 2001.
- [48] Gehring, A., Jimenez-Molinos, F., Kosina, H., Palma, A., Gamiz, F., & Selberherr, S., «Modeling of retention time degradation due to inelastic trap-assisted tunneling in EEPROM devices.,» *Microelectronics Reliability*, vol. 43, n° 9-11, pp. 1495-1500, 2003.
- [49] Gamiz, F., Roldán, J. B., Kosina, H., & Grasser, T., «Improving strained-Si on Si/sub 1-x/Ge/sub x/deep submicron MOSFETs performance by means of a stepped doping profile.,» *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 48, n° 9, pp. 1878-1884, 2001.
- [50] Kittel, C., Knight, W.D., Ruderman, M.A., *Mechanics*. Vol.1. Berkeley Physics Course. 2nd Edition, McGraw Hill Book Company, 1973.



**Contestación al discurso de Ingreso en la Academia de  
Ciencias Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales de  
Granada del**

**Ilmo. Sr. D. Francisco Gámiz Pérez**

**Excmo. Sr. D. Alberto Prieto Espinosa**

Excelentísimo Sr. Presidente,

Excelentísimos e Ilustrísimos miembros de la Academia

Señoras y Señores:

Permítanme que comience esta intervención expresando mi satisfacción y profundo agradecimiento hacia la Junta de Gobierno de esta Academia por el privilegio y honor que me concede al contestar, en su nombre, en este acto de ingreso como nuevo académico, al discurso pronunciado por el Profesor Francisco Gámiz Pérez, así como destacar los aspectos más sobresalientes de su currículum vitae y de su labor investigadora.

Este privilegio se puede calificar de grato y de fácil. Grato, por la relación que he mantenido con el nuevo académico en diferentes contextos y situaciones desde que fue alumno mío hace 30 años (1990-1991), y fácil por los excepcionales méritos académicos y científicos que concurren en el Profesor Gámiz, que sin duda, como argumentaré más adelante en mi intervención, es uno de los pioneros en nuestra Universidad en investigar en nuevos materiales y desarrollar nuevas aplicaciones de los mismos.

Me voy a referir en primer lugar a su discurso. Cuando leí por primera vez su borrador sentí un gran deleite, de forma de que a pesar de sus 19 páginas (sin figuras, o “santos” como se decía en mi infancia) lo hice de un tirón.

Sus primeras 8 páginas versan sobre el nacimiento y desarrollo de la Electrónica. Una vez más nos impresiona el ingenio humano de los pioneros de esta disciplina para describir y modelar fenómenos naturales de una complejidad extraordinaria. Como muy bien indica el Prof. Gámiz, la Electrónica trata del estudio y aplicación del comportamiento de los electrones en diversos medios sometidos a la acción de campos eléctricos y magnéticos. Estamos hablando de



electrones, que son partículas de un tamaño de un fentometro (10-15 m; billonésima parte de un milímetro), y la Electrónica consigue generar, encauzar, controlar, detectar y medir partículas elementales tan diminutas y de esta forma construir dispositivos y sistemas que han sido imprescindibles para el desarrollo de las telecomunicaciones y el advenimiento de la sociedad digital. De esta forma la Electrónica se configura como uno de los pilares fundamentales de las Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones que han hecho y están haciendo posible los extraordinarios avances que se están dando en la práctica totalidad de las ciencias y en la sociedad del bienestar.

Me ha agradado notablemente que el Prof. Gámiz, al describir las tres etapas fundamentales de los dispositivos electrónicos: tubos de vacío, semiconductores y circuitos integrados, citase al primer microprocesador para aplicaciones generales (8 bits), desarrollado por Intel y comercializado en 1972 como fue el 8008. Esta referencia me ha rememorado los años de mi tesis doctoral, dirigida por nuestro querido compañero de academia Bernardo García Olmedo. Bernardo. A su vuelta de una estancia en Estados Unidos me habló de que acababan de desarrollar allí unos nuevos circuitos integrados que en su interior albergaban nada menos que todos los componentes de

las unidades de control y aritmético-lógica de un computador de uso general, y que en mi tesis debía explorar y trabajar con estos revolucionarios dispositivos denominados microprocesadores. Intel era conocida fundamentalmente por la fabricación de circuitos integrados de memoria para computadores y tenía su delegación de distribución en España en Barcelona. Después de la conversación con el Prof. García Olmedo me puse en contacto telefónico con esa delegación de Intel, y al preguntar por microprocesadores, nadie allí sabía de qué estaba hablando, y me pasaban la comunicación telefónica de un despacho a otro. Al final quedaron en llamarme cuando lograsen enterarse en la central, en EEUU, de qué estaba hablando y, en su caso facilitarme la información que solicitaba. Así lo hicieron. Cuento esta anécdota para poner de manifiesto que en nuestra Universidad hemos sido y somos pioneros en el uso de diversas tecnologías y muy frecuentemente no hemos sabido darle la visibilidad que merecen.

El Prof. Gámiz menciona en su discurso que gracias a la tecnología del silicio, y al escalado de los dispositivos electrónicos, ha sido posible desarrollar grandes sistemas de cómputo en la forma de granjas de servidores y supercomputadores, y cita al supercomputador SUMMIT,

considerado en la actualidad el más potente del mundo, pudiendo ejecutar hasta 200 mil billones de operaciones con números reales por segundo. Sobre esta cuestión deseo hacer unas reflexiones. Los arquitectos de computadores diseñamos nuestros sistemas con las herramientas y elementos que nos ofrece la tecnología electrónica; así al miniaturizar más, incluimos más funciones en nuestros diseños de circuitos integrados, y concretamente en los chips de los procesadores. De esta forma, con un proceso de 14 nm de transistores de campo en aleta (FinFET) proporcionado por los electrónicos, los arquitectos de computadores de IBM diseñaron el microprocesador IBM POWER9 22C, integrando 9 mil millones de transistores. La frecuencia máxima de funcionamiento de este microprocesador, de los inicios de 2018, es de 4 GHz y en realidad en su superficie de 695 mm<sup>2</sup> contiene un total de 22 procesadores (“nucleos” o en inglés “cores”). Con este potente microprocesador evidentemente no pueden llegar a ejecutarse 200 mil billones de operaciones por segundo, como hace el SUMMIT; pero los arquitectos de computadores desde hace tiempo hemos logrado ir más allá de lo que nos ofrece la tecnología electrónica utilizando, entre otras técnicas, paralelismo; consistente en utilizar y hacer funcionar distintos dispositivos electrónicos en paralelo. Así se construyen los modernos computadores, y concretamente el

SUMMIT, que está constituido por un clúster de más de 109.000 microprocesadores Power9 interconectados por una red de datos que hace posible el funcionamiento simultaneo y cooperativo de sus 2.414.592 núcleos. En definitiva, la combinación entre los conocimientos de la electrónica y de la arquitectura de computadores hace posible la obtención de los computadores actuales, y cuanto más se perfeccione la electrónica los sistemas construidos serán menos complejos y más fiables.

El discurso, después del análisis de la evolución histórica de la Electrónica, continúa describiendo algunos de los retos actuales más relevantes de la Electrónica. Como muy bien indica el Prof. Gámiz el objetivo fundamental ha sido, y sigue siendo, el escalado de los dispositivos electrónicos haciéndolos cada vez más pequeños, de forma que año tras año podamos incluir un mayor número de transistores por área de semiconductor, lo cual lleva consigo que al hacer más pequeño el dispositivo, éste se comporte mejor, sea más rápido y consuma menos energía, y sea más barato.

La Electrónica, y más concretamente la micro y nanoelectrónica incansablemente han ido cubriendo metas a lo largo de los años, y la Ley de Moore, citada por el nuevo

académico, más que una previsión se ha comportado como un reto claro para la industria de circuitos integrados: duplicar cada dos años. Esta evolución vertiginosa ha acostumbrado a nuestra sociedad a disfrutar permanentemente de mejoras en todas las aplicaciones en que interviene la electrónica: desde nuestros teléfonos inteligentes, que en realidad son auténticos computadores de bolsillo, a los grandes supercomputadores.

Llegados a este momento deseo hacer unas consideraciones sobre la Ley de Moore. Inevitablemente la miniaturización prevista por Moore tiene unos límites físicos y químicos. En efecto, los circuitos integrados más densos que se están fabricando en la actualidad usan unas dimensiones del orden de decenas de nanómetros. Hay que recordar que un nanómetro (nm) es el tamaño aproximado de una molécula (y unas 10 veces el de un átomo) y en esas dimensiones no son válidos los modelos y fórmulas de la física clásica y empiezan a aparecer fenómenos que sólo pueden ser descritos por la mecánica cuántica. Es decir, que en esas dimensiones ya no se puede aplicar todo el andamiaje de desarrollo tradicional de dispositivos electrónicos. Hay investigadores que indican que la Ley de Moore ha muerto. El propio Moore en 2007 vaticinó que podría durar hasta el 2022; aunque INTEL, más optimista,

proclama que la Ley de Moore seguirá viva hasta 2023, estando su límite en 7 nm.

Como consecuencia del límite de miniaturización, si se desea mantener el ritmo de mejora es necesario desarrollar nuevos conceptos, materiales y tecnologías. Así, por ejemplo, se trabaja en dotar de una estructura tridimensional a los procesadores que permita incrementar su capacidad de almacenamiento y su velocidad, sin alterar el tamaño físico, de esta forma se fabricarían capas tridimensionales de transistores interconectadas entre sí. También se está investigando con nuevos materiales -más allá del Silicio- y con nuevos enfoques como la computación fotónica o la esperanzadora computación cuántica.

En este contexto de búsqueda de nuevas ideas se circunscriben las líneas de investigación del Prof. Gámiz, centradas en nuevos materiales bidimensionales y concretamente el grafeno

Las aplicaciones del grafeno, debido a sus extraordinarias propiedades mecánicas, eléctricas, térmicas y ópticas, son muy amplias. El Prof. Gámiz describe en el texto de su disertación de forma clara algunas de ellas como la fabricación de componentes en las industrias automovilística, aeronáutica y

de edificación, desalinización y depuración de aguas, recubrimiento de objetos metálicos protegiéndolos contra la corrosión y la oxidación, fabricación de disipadores de calor para dispositivos electrónicos, construcción de supercondensadores para almacenamiento de energía eléctrica, fabricación de pantallas táctiles, teléfonos móviles inteligentes y sistemas informáticos, en general, mecánicamente flexibles, y sensores de alta sensibilidad. Precisamente en el ámbito de las aplicaciones del grafeno y otros materiales bidimensionales y su co-integración con la tecnología de silicio es donde se centran las investigaciones que se desarrollan en el Laboratorio de Nanoelectrónica, Grafeno y Materiales Bidimensionales ubicado en el CITC-UGR, que fue creado y sigue siendo dirigido por el Prof. Gámiz

Sobre esta primera parte del discurso del Prof. Gámiz, dedicada al nacimiento, desarrollo y retos de la Electrónica, no recuerdo haber leído en un texto de tan sólo unas 10 páginas, un contenido más riguroso y condensado sobre el tema. Condensar es difícil y requiere un conocimiento muy profundo sobre lo que se dice. Recuerdo la idea clara que tenía el presidente estadounidense Wilson (que gobernó el país entre 1913 y 1921) sobre la preparación de los discursos y que

sintetizó indicando algo así como: si quieres que hable durante una hora o más sobre un tema de mi especialidad estoy ya listo, si quieres que hable durante 20 minutos, necesitaré dos semanas, pero si quieres que hable tan sólo durante cinco minutos, necesitaré un mes o más para prepararme

Posteriormente a la identificación de los objetivos científicos que tiene planteados, el Prof. Gámiz nos describe sus andanzas como investigador: cómo empezaron sus investigaciones y los contactos que generó con centros extranjeros, imprescindibles en una disciplina como la Electrónica en evolución permanente y vertiginosa.

Una característica del Prof. Gámiz es su talante personal, y puede considerarse como paradigma de las peculiaridades que el mismo considera debe tener un investigador. Como él mismo indica: “No se puede ser buen científico si antes no se es buena persona. El científico tiene que ser generoso y honesto, tiene que ser leal, y sobre todo, tiene que ser agradecido. La generosidad y la honestidad están en el ADN del hombre de Ciencia”. Estas palabras describen a la perfección su carácter personal que sirve de substrato de su talla como científico.



Su lealtad y el ser agradecido le lleva a no olvidar a las personas que le ayudaron en los primeros momentos y a lo largo de su trayectoria en nuestra Universidad haciendo mención a las personas que hoy no pueden estar aquí y que se sentirían orgullosos de este acto: Safwan, Juan Antonio Morente y Pedro Cartujo. A todos ellos nuestro emocionado recuerdo.

Pone el símil de su vida científica con un viaje en tren. Yo he sido uno de los pasajeros que ha viajado en él, a su lado, en los años del 2009 a 2013, y si bien es cierto que le ayudé muy activamente en la creación de su Laboratorio, no lo es menos su apoyo y lealtad hacia mí durante los años que fui Director del CITIC.

Por otra parte, la talla científica y personal del Prof. Gámiz está en consonancia plena con la formación que fue adquiriendo a lo largo de su vida.

Nació en Granada hace 52 años (1968). Estudió EGB y bachillerato en el Instituto Juan XXIII de Granada. Al terminar sus estudios de secundaria, no tenía muy claro que estudiar, dudando entre Matemáticas, Física e Informática. Al final rellenó las solicitudes de las tres matrículas y cuando llegó a la

Secretaría de la Facultad con sus tres sobres rellenos, echando suertes salió Física, que cursó entre 1986 y 1991, obteniendo 23 matrículas de honor, 1 sobresaliente y 1 notable. Desde luego tuvo suerte, a juzgar por los éxitos alcanzados, aunque muy probablemente también la hubiese tenido si se hubiese matriculado en alguna de las otras dos titulaciones en contienda. Como le quedaba el gusanillo de no haber realizado Informática, cursó también los dos primeros años de esta titulación.

En enero de 1992 consiguió una beca FPU, y 3 años después (1994) defendió su Tesis Doctoral. Rápidamente, en el siguiente curso (a finales de 1995), obtiene la plaza de Titular de Universidad. Justo 8 años después (estamos en diciembre 2003) logra la Habilitación Nacional al Cuerpo de Catedráticos en una oposición nacional con 27 candidatos y con tan solo dos plazas a concurso, siendo el más joven de los participantes. Finalmente accede a la plaza de Catedrático que ocupa en 2005 con tan sólo 36 años de edad.

Sus esfuerzos y labor desarrollada han sido ampliamente reconocidos y distinguidos, habiendo obtenido, entre otros, los siguientes premios:

- Premio extraordinario de Licenciatura en Ciencias Físicas (1991),
- Premio Nacional a la Terminación de Estudios Universitarios del Ministerio de Educación (1991),
- Premio de la Academia de Ciencias Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales de Granada (1991),
- Premio de la Fundación Sevillana de Electricidad al mejor expediente en el área de Ciencias de las Universidades Andaluzas (1991),
- Premio extraordinario de Doctorado en Ciencias Físicas (1994),
- Premio del Consejo Social a la Trayectoria de Jóvenes Investigadores (2003).
- Premio del Consejo Social al Grupo de Investigación que coordina (2011), y
- Premio “Universidad de Granada –Caja Rural de Granada a Investigadores con alta I+D+i” (2016).

Por otra parte, Francisco Gámiz es miembro del Circulo Mentor para la Investigación del Consejo Social de la Universidad de Granada, y miembro de la Junta de Dirección del CITIC-UGR.

Como he citado anteriormente la labor científica del Prof. Gámiz gira alrededor del Laboratorio Singular de Nanoelectrónica, Grafeno y Materiales Bidimensionales ubicado en el CITIC-UGR, por él creado en 2008 y del que sigue siendo Director. Como el mismo ha indicado este Laboratorio está dotado con el equipamiento e infraestructuras que lo hacen uno de los más avanzados de Europa en su especialidad, con una inversión que ha superado los 6 millones de euros en los últimos diez años. Dentro de este contexto, el Prof. Gámiz ha participado en la publicación de más de 300 artículos internacionales

Como ejemplo de la relevancia de su producción científica, puedo citar la publicación aparecida hace 6 meses (septiembre 2019) en la prestigiosa revista NATURE ELECTRONICS y que describe el trabajo realizado conjuntamente entre su grupo de Granada y el Centro de Investigación de IBM en Zürich (Suiza). Consiste en la concepción y fabricación de una celda de memoria RAM dinámica (DRAM), que está considerada como la más pequeña jamás construida, con una longitud de puerta de tan sólo 14 nanómetros y utilizando como material, en lugar de Silicio, Arseniuro de Galio e Indio (InGaAs)

Otros hitos y méritos destacables del Prof. Gámiz son los siguientes:

- Ha gestionado y dirigido numerosos proyectos y contratos nacionales y autonómicos, destacando su participación en 10 proyectos europeos, coordinando tres de ellos.
- Ha participado en varios proyectos industriales europeos de los programas CATRENE, o ECSEL: REACHING-22, PLACES2BE, WAYTOGO-FAST.
- Ha dirigido 12 Tesis doctorales
- Ha pronunciado numerosas conferencias invitadas, entre otras, en el Massachusetts Institute of Technology, Korea Institute of Science and Technology, Tokyo Institute of Technology, en el Institute Polytechnique de Grenoble, en el CEA-LETI en Francia y en las Universidades de Kyoto en Japón y Technical University of Vienna en Austria.
- Ha realizado estancias investigadoras en el IBM TJ Watson Research Center en Nueva York (EEUU), en el MINATEC de Grenoble (Francia), y en la TU Wien (Austria).
- Ha presentado varias patentes internacionales en Estados Unidos, Japón, Corea del Sur y la Unión Europea sobre memorias y dispositivos semiconductores.
- Es Coordinador de la Red Europea EUROSOI y socio fundador del European Silicon Nanoelectronics Institute

(SINANO), y miembro del panel de Expertos de la IEEE International Roadmap for Devices and Systems.

- En 2010 firmó acuerdos de colaboración con SOITEC, IMEC, CEA-LETI, Tokyo Institute of Technology, IMEP-MINATEC, Glasgow University, GlobalFoundries, o GSS(UK).
- En 2018 firma un contrato de investigación con el Prof. Yong Tae Kim del Korea Institute of Science and Technology, y un acuerdo marco de investigación y otro de co-tutela de doctorado con la National Chiao Tang University (NCTU) de Taiwan (Prof. Edward Chang).

En definitiva, podemos afirmar categóricamente que el Prof. Gámiz es una persona cabal, un excelente científico y un universitario integral, y por todo ello, excelentísimos e ilustrísimos miembros de la Academia, Señoras y Señores, me produce una gran satisfacción el ingreso en nuestra noble institución del Profesor Francisco Gámiz Pérez, como Académico, y contar con su participación activa en la misma. Además de sus excepcionales cualidades tanto científicas y académicas como humanas, y que he tratado de poner de manifiesto, el ingreso de esta relevante personalidad supone reforzar dentro de nuestra academia un campo, hoy día de importancia trascendental, como es el de la Electrónica.

Ilustrísimo Profesor Gámiz, en nombre de la Academia y en el mío propio, le doy la bienvenida a la misma con mis más cordiales felicitaciones, a la par que le agradecemos su disposición a colaborar en las tareas propias de esta Institución, y le deseamos que pueda seguir con tanto éxito su tarea iniciada hace 30 años de “jugar con electrones”, así como toda clase de venturas y felicidad tanto personales como familiares.

Y convencido de la idea de Voltaire acerca de que el secreto de no aburrir es no tratar de decirlo todo, concluyo mi intervención.

Muchas gracias.

Alberto Prieto Espinosa