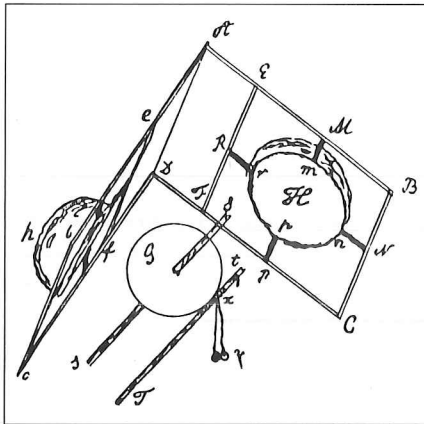


separada media pulgada. $T t$ es un electrómetro formado por una barra de vidrio, recubierta con una lámina



metálica desde el punto x al extremo más próximo, donde cuelgan dos hilos terminados en unas bolitas que se separan cuando la parte metálica de la barra toca a un cuerpo cargado. Cavendish cerraba el bastidor con la esfera G en su centro y unía las esferas H y G con un hilo conductor que no se muestra en la figura. A continuación aplicaba una carga eléctrica con una botella de Leyden (condensador), previamente cargada. Después abría el bastidor, desconectaba el hilo que unía las esferas H y G y con el electrómetro comprobaba si la esfera G estaba cargada.

Comprobó que no existía carga en la esfera G , por tanto se demostraba que la carga se distribuye sobre la superficie externa de la capa esférica H . En consecuencia se infería que la fuerza entre las cargas obedece a la ley de proporcionalidad con el inverso del cuadrado de la distancia, análoga a la que corresponde a las masas.

En un excelente análisis de los datos experimentales, Cavendish demostró que, si la fuerza disminuye conforme a r^{-n} , los resultados del experimento demuestran que n difiere de 2 en menos de 0,02.

Cavendish no consideró necesario publicar este trabajo, lo que tuvo como consecuencia no adjudicarse tal descubrimiento, y que Coulomb, mediante su experimento con la balanza de torsión, descubriera que la fuerza entre cargas obedece a la ley de proporcionalidad con el inverso del cuadrado de la distan-

cia, trabajo que publicó en 1785, y le permitió adjudicarse el honor que podía haber correspondido a Cavendish.

Henry Cavendish siguió investigando, hasta su muerte en 1810, en electricidad y otras ramas de la Física. Los trabajos sobre electricidad, que tampoco se publicaron hasta que Maxwell lo hiciera en 1879, versaban sobre aspectos tan interesantes como medida de capacidades relativas de conductores y condensadores, así como la conductividad de metales y disoluciones formadas por líquidos conductores.

Victoriano López Rodríguez
Depto. de Física de los Materiales

Su Excelencia el Transistor cumple cincuenta años

RESUMEN

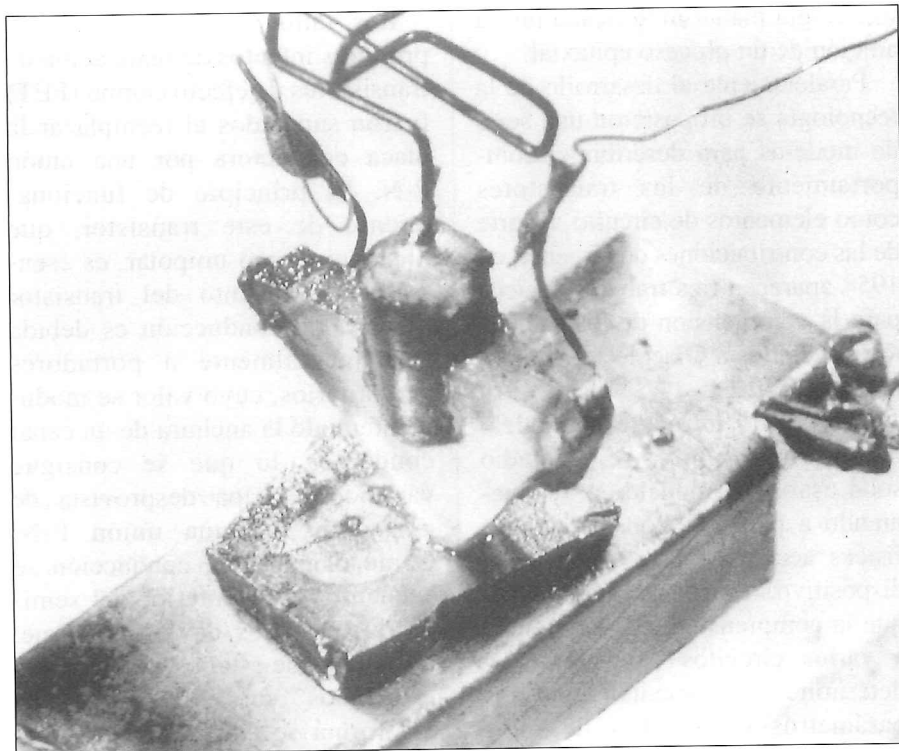
Aprovechando la circunstancia del cincuenta aniversario del descubrimiento del transistor, comentamos la evolución de la Electrónica asociada a la década 50-60, que inaugura la Electrónica fría, y la época posterior, desde 1960 hasta nuestros días, dominada por la tecnología integrada y el crecimiento constante de la densidad de integración de funciones, soporte de todo el desarrollo de las tecnologías de la información y las comunicaciones.

1. UN CUMPLEAÑOS EN LA ÉPOCA DE LA TECNOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES

Vivimos en la época de la tecnología de la información y las comunicaciones en la que los grandes sistemas electrónicos de comunicación, cálculo, instrumentación y control constituyen una red global donde se mueve toda la actividad científico-técnica, social y económica. Es poco frecuente que

nuestros jóvenes alumnos no sepan qué es la internet, los entornos multimedia o la realidad virtual y que no conozcan las últimas ofertas en PC's con prestaciones medibles en términos de megacyclos del reloj principal o megabytes de la memoria RAM o del disco duro. Sin embargo, creo que es poco frecuente encontrar alumnos jóvenes que sepan que este año se cumple el cincuenta aniversario del descubrimiento del *transistor*, al que en gran medida se deben todos esos logros de la Electrónica integrada que subyace a todas esas aplicaciones que hemos mencionado previamente.

Con el descubrimiento del transistor en diciembre de 1947 (publicado en junio de 1948), John Bardeen y Walter Brattain inauguraron la época de los semiconductores y la Electrónica fría con alto grado de integración y con ello la posibilidad física de toda la tecnología actual en comunicación, cálculo, instrumentación y control. El transistor ("transfer resistor"), en palabras de sus descubridores, es un dispositivo de tres terminales "que puede emplearse como amplificador, oscilador y para otros propósitos para los que hasta ahora (1948) se usaban las válvulas de vacío". El primer transistor consistía en tres electrodos situados sobre un bloque de germanio (figura 1). Dos, llamados "*emisor*" y "*colector*", eran del tipo rectificador de punta de contacto y se colocaron muy cerca. El tercero, llamado "*base*", consistía en una amplia superficie de baja resistencia sobre la que se establecían los contactos del emisor y el colector. El germanio usado era un semiconductor extrínseco tipo N. Cuando los dos puntos de contacto se situaron muy próximos y se polarizó en sentido directo la unión de emisor y en sentido inverso la de colector, se observó que una parte importante de la corriente inyectada por el emisor (a través de la baja resistencia de una unión polarizada en sentido directo) alcanzaba el colector, que la recogía sobre su alta resistencia



Fotografía del primer transistor.

(propia de una unión polarizada en inversa), dando así lugar a una *ganancia*. Es decir, a una amplificación de la señal de entrada, consecuencia de mantener un nivel de corriente análogo sobre una resistencia mucho más alta (transfer resistor). Teníamos así un amplificador frío sobre un cristal semiconductor.

Hasta 1948 todos los dispositivos electrónicos estaban basados en el movimiento de electrones en el vacío o gases, bajo el control de campos eléctricos y magnéticos, y en la generación de estos portadores mediante emisión termoiónica, fotoeléctrica o secundaria. A partir de esta fecha los dispositivos electrónicos más relevantes están basados en la inyección y el transporte controlado de electrones libres o ligados en el interior de cristales semiconductores en los que hay heterogeneidades controladas que permiten realizar las mismas funciones que antes realizaban las válvulas y otras nuevas no pensadas hasta ahora. Nace así la Electrónica de los semiconductores pasando a primera línea la Física del Estado Sólido.

2. LA ETAPA DE LOS TRANSISTORES EN LA EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

Como en la etapa anterior de la Electrónica y en la mayoría de las Ciencias, los avances se deben a la continua interacción entre los descubrimientos de nuevos dispositivos y los avances teóricos en la física, entremezclados de forma tal que unos resultados potencien a otros. Mirando hacia atrás vemos ahora cómo fue la Cristalografía y la Tecnología química quienes produjeron los materiales semiconductores. Estos semiconductores, junto con el descubrimiento del efecto transistor y una buena coyuntura económico-militar, produjeron la primera fase de la microelectrónica y la tecnología de los circuitos integrados. De aquí nace una nueva etapa de la Física del Estado Sólido, justificada por la utilidad que se desprende de sus resultados en tanto que hacen posible nuevos dispositivos electrónicos. Por otro lado, se diseñan nuevos ordenadores que potencian las comunicaciones, la tecnología aero-

espacial, la investigación científica (con nueva instrumentación) y la medicina. Esta maraña de descubrimientos, desarrollos teóricos y aplicaciones, refuerzan la investigación básica y constituyen la base de la segunda revolución electrónica.

La idea que persiguieron los investigadores que intentaron descubrir lo que ahora conocemos por transistor era obtener un dispositivo de estado sólido que sustituyera al triodo. Aunque el transistor nace en diciembre de 1947 en los laboratorios de la Bell Telephone (transistor de puntas de contacto que hemos descrito muy cualitativamente en el apartado anterior), su historia "prenatal" se remonta a 1925 en que Lillienfeld comienza a patentar dispositivos que hoy llamaríamos transistores. Su primera patente se acerca mucho a los transistores de efecto campo. Ninguno de sus inventos llegaron a desarrollarse comercialmente dado el escaso conocimiento de su fundamento físico y el bajo nivel de la tecnología de la época. En 1930 hay otro intento de conseguir un transistor debido a Welser, quien pretende realizar en un cristal una copia de la estructura de las válvulas de vacío introduciendo una espiral metálica que sirviera de electrodo control en un sandwich de cobre y óxido de cobre. En esta línea están también los dispositivos de Holst y Van Geel, que introducían un electrodo control entre selenio y plata.

Así llegamos a 1938 cuando Holden, Battain y Shockley, en los laboratorios de la Bell Telephone, inician una investigación buscando un dispositivo amplificador de estado sólido. Teóricamente, pensaban, introduciendo un cristal semiconductor en un campo eléctrico sería posible modificar su conductividad y así producir un amplificador. Esta predicción se ha cumplido más tarde con los transistores de efecto campo con puerta aislada (MOS-FET), pero entonces falló el intento. El fallo fue atribuido, correctamente, por Bardeen (1947) a la existencia de estados superficiales (estados Tamm y estados Schockley) que

producían una curvatura de las bandas haciendo aparecer en la superficie del semiconductor capas de acumulación, vaciamiento e inversión.

En una serie de experimentos encaminados a estudiar estos efectos superficiales en semiconductores, Bardeen y Brattain usaron un conductor para inyectar cargas en el cristal y otro para sacarlas. Sorprendentemente, cualquier cambio en la corriente de entrada aparecía amplificado en la salida. Así nació el primer transistor (transfer resistor) llamado "de puntas de contacto" tal como hemos comentado en el primer apartado. Estaba formado por una pequeña capa de germanio tipo N en cuya superficie se apoyaban dos alambres llamados emisor y colector. El tercer contacto, llamado base, se realizaba en la parte opuesta de la capa de cristal semiconductor. Este primer transistor presentaba un funcionamiento poco seguro y un alto nivel de ruido, por lo que tuvo poco interés comercial. Al año siguiente, Shockley inventó un nuevo transistor, llamado transistor de unión, formado por dos muestras semiconductoras tipo N (emisor y colector), entre las que se encontraba otra más pequeña tipo P (base).

En 1948 se inventa el transistor de unión y en 1952 aparece en el mercado. En principio las uniones se hacían mediante aleaciones de indio en las caras opuestas de una lámina de germanio que, posteriormente, se encapsulaba en plástico resistente a la luz y al agua. Estos transistores se deterioraban con el tiempo. En 1953 aparecen los transistores de barrera, que permitían bases más estrechas y fabricación automática.

El primer desarrollo importante en la física de los transistores se debe a Kroener, quien descubrió la utilidad de una impurificación gradual de la región de base. El siguiente paso fue el desarrollo de la tecnología planar, que aparte de las ventajas funcionales, presentaba la posibilidad de la fabricación automática de muchas unidades a la vez. En la actualidad los transistores bipolares se construyen con esta

tecnología planar modificada por la adición de un proceso epitaxial.

Paralelamente al desarrollo de la tecnología se propusieron una serie de modelos para describir el comportamiento de los transistores como elementos de circuito. Aparte de las contribuciones de Kroener, en 1954 aparecen tres trabajos básicos para la comprensión de los transistores, debidos a Giacoletto, Ebers-Moll y Moll.

Giacoletto introdujo el modelo híbrido en "pi". Antes de su estudio solía usarse un modelo en T, obteniendo a partir de consideraciones físicas acerca de la estructura del dispositivo. Giacoletto puntualizó que la comprensión física conducía a varios circuitos equivalentes y determinó experimentalmente los parámetros de muchos de ellos sobre un amplio rango de frecuencias. La conclusión acerca de la conveniencia del "pi" fue debida a que sólo incluía un generador dependiente, se podía usar en distintos rangos de frecuencia, permitía distintos grados de aproximación y cada una de sus componentes representaba un proceso físico distinguible. Así es posible decidir qué componentes del modelo deben incluirse en cada diseño específico.

Ebers y Moll obtuvieron por primera vez un par de ecuaciones que representaban las características de continua de un transistor sobre todo el rango de posibles condiciones de polarización. Tales ecuaciones representan la interacción entre dos uniones P-N. Finalmente, también en 1954, se intenta caracterizar al transistor en conmutación. Las ecuaciones de Ebers-Moll no podían predecir todos los procesos transitorios. Moll presenta un conjunto de ecuaciones relacionando el tiempo de conmutación con las configuraciones y las condiciones de trabajo del circuito.

Estamos así en 1960. La década de los años 60 presenta tres líneas importantes: El desarrollo y comercialización de los dispositivos de efecto campo, el paso de la tecnología del germanio a la del silicio, y el nacimiento y espectacular desarrollo de los circuitos integrados.

Los fallos encontrados en los primeros intentos de realización de transistores de efecto campo (FET) fueron superados al reemplazar la placa conductora por una unión P-N. El principio de funcionamiento de este transistor, que Shockley llamo unipolar, es esencialmente distinto del transistor bipolar. La conducción es debida fundamentalmente a portadores mayoritarios, cuyo valor se modula alterando la anchura de un canal conductor, lo que se consigue variando la capa desprovista de portadores de una unión P-N. Como el canal de conducción se encuentra en el interior del semiconductor, lejos de la superficie, los efectos de estados superficiales "atrapados" son despreciables; de esa forma se evitan los inconvenientes de los primeros dispositivos de este tipo; las principales ventajas de este transistor, frente al bipolar, son su impedancia de entrada mucho más elevada, mayor ganancia y menor ruido; el principal inconveniente es que el producto ganancia-anchura de banda es menor. Se han desarrollado tres estructuras para los dispositivos de efecto campo:

a) *Transistor de efecto campo tipo unión (JFET).*

b) *Transistor de efecto campo, metal-aislante-semiconductor (MISFET).*

c) *Transistor de película delgada (TFT).*

Las limitaciones más importantes de los transistores bipolares residían, en sus orígenes, en las aplicaciones a frecuencias elevadas y a la Electrónica de potencia, con todos sus procesos de conversión y rectificación, donde se manejan señales del orden de 100 amperios y 300 voltios por ejemplo. Los transistores de potencia poseen el mismo principio de funcionamiento que los de pequeñas señales a baja potencia pero su forma de construcción es tal que les permite disipar más energía y manejar valores de corriente y de tensión también mayores. Un tran-

sistor se considera de potencia cuando puede operar con corrientes de colector superiores a los 100 miliamperios. Con la sustitución del germanio por el silicio, se ha superado fácilmente la barrera de los 5 amperios con ganancias aceptables.

La tecnología planar no produjo transistores de potencia, sí en cambio la epitaxial (año 1960), que permitió disminuir el valor de la tensión en saturación y aumentar el ancho de banda. En esta época aparecen también nuevas estructuras físicas en los transistores dentro de las tecnologías clásicas. Una de éstas fue la estructura de "peine" en la que el emisor consta de una serie de prolongaciones intercaladas con otras que se unen para formar la base. Esta estructura, realizada en la tecnología planar-epitaxial, permanece en nuestros días y ha producido transistores de potencia de alta frecuencia (80 vatios a 30 MHz). Otra de las estructuras físicas basadas en el mismo principio, e introducida en 1976 por la compañía RCA, es la multiemisor en la que muchos emisores se unen a una misma región de base. Desde un punto de vista funcional todo ocurre como si hubiésemos conectado muchos transistores de baja potencia en paralelo. Ya en 1970 existían dispositivos de este tipo que manejaban 100 vatios a 50 MHz.

3. EN EL 2010 CELEBRAREMOS EL CINCUENTA ANIVERSARIO DE LOS CIRCUITOS INTEGRADOS

La década 1960-1970 fue la de los *Circuitos Integrados* y desde entonces el aumento de la densidad de integración de funciones electrónicas, tanto analógicas como digitales, ha continuado de forma imparable. Las distintas familias de circuitos *microprocesadores* son paradigmáticas de esta evolución. Este desarrollo tecnológico en la Electrónica de semiconductores está teniendo tanto o más impacto que la invención del transistor. El transis-

tor proporcionó una sustitución de las funciones de las válvulas como dispositivos activos básicos en el diseño electrónico, pero los circuitos integrados fueron la base de la nueva filosofía del diseño de sistemas electrónicos.

Podemos considerar la génesis de los circuitos integrados desde dos perspectivas: la conceptual y la tecnológica. Conceptualmente los circuitos integrados nacen de la microelectrónica de Kilby. Aunque el área ocupada por su multivibrador (12 milímetros cuadrados) parecía pequeñísima en 1960, hoy se considera este resultado como auténtica "prehistoria" de los circuitos integrados.

La idea básica de toda la tecnología integrada es sencilla: producir sistemas electrónicos de funciones cada vez más complejas sobre un solo bloque de silicio reemplazando los elementos discretos (transistores, diodos, resistencias, condensadores, conductores y aislantes) por áreas funcionalmente equivalentes. Estas áreas amplificadoras, rectificadoras, resistivas o almacenadoras de carga quedan conectadas directa e inseparablemente y permiten obtener sobre el cristal sustrato una especie de "fotografía en relieve" del circuito discreto equivalente. Es como si dibujáramos el circuito sobre el cristal de forma que al dibujar un componente dejásemos impresa la función eléctrica que lo caracteriza.

Desde una perspectiva tecnológica, los circuitos integrados (CI) partieron de los logros obtenidos en la fabricación de los transistores de silicio. Los primeros CI disponibles comercialmente se obtuvieron en 1962 con tecnología planar-epitaxial y en 1964 se introdujo la tecnología MOS. La realización de elementos pasivos e interconexiones entre componentes en un CI se hace con tecnología de películas delgadas o procesos de metalización, también existentes desde antes de 1960. No obstante, el principal factor del éxito comercial de los CI es la posibilidad de proceso simultáneo de muchísimas unidades, así

como la posibilidad de automatizar su proceso de fabricación.

Podemos clasificar los circuitos integrados según su campo de aplicación, según el grado de integración y según la tecnología soporte. En cuanto al campo de aplicación se clasifican en digitales y analógicos. Los primeros han experimentado un avance mucho mayor gracias a sus especiales características eléctricas y a la demanda de un mercado, el de la computación, económicamente potente. La forma repetitiva de los circuitos lógicos y la sola necesidad de distinguir entre dos niveles de tensión los hizo especialmente adaptables a la tecnología integrada.

Los circuitos analógicos son más complicados que los digitales por eso están tardando más en encontrar la perfección necesaria en el proceso de integración. El primer circuito analógico con perfección comparable a los digitales fue el amplificador operacional. Hace falta encontrar una teoría modular para la Electrónica Analógica que permita el diseño de gran número de sistemas electrónicos con muy pocos módulos básicos y con unas leyes de interconexión lo suficientemente potentes para conseguir la riqueza funcional suficiente para desplazar a la Electrónica Digital en el campo analógico. La historia nos está demostrando que el proceso real es más bien el inverso. Es decir, se está utilizando tecnología digital para sintetizar funciones genuinamente analógicas. El mundo del audio y del vídeo es ya digital. Y lo mismo ocurre con las comunicaciones y el control.

En cuanto al grado de integración o complejidad de un CI existen varios niveles de integración: en pequeña escala (SSI), en media escala (MSI), en gran escala (LSI), en muy gran escala (VLSI). La integración en pequeña escala está realizada en tecnología bipolar y CMOS, y englobaba todos aquellos CI cuyo número de componentes era mayor que veinte y menor que cien. Ahora sólo es un concepto histórico. En 1967 ya existían circuitos integrados con más de 100 componen-

tes. Comenzaba así la integración en media escala, que ofrece en un solo circuito funciones propias de subsistemas electrónicos tales como sumadores binarios, contadores digitales, registros de desplazamiento, decodificadores y "memorias" de cuatro bits. De nuevo este nivel de integración es prácticamente historia. A finales de 1969 aparece la integración en gran escala o LSI (con miles de componentes por circuito). Aunque existen CI en LSI fabricados en tecnología bipolar, el gran auge de este nivel de integración y las perspectivas de futuro se deben a la adopción de la tecnología MOS. A partir de 1965 empiezan a usarse los transistores unipolares en circuitos integrados. De todos ellos, el presente y el futuro próximo está controlado por los MOS, en especial la familia C-MOS. Este nivel de integración abre las puertas de la actual etapa revolucionaria dentro de la tecnología del estado sólido: Aumenta constantemente la densidad de componentes integrados y se introduce al ordenador como instrumento de diseño y control de fabricación. Es decir, la propia tecnología se realimenta y autoabastece. Los transistores y los circuitos integrados que hicieron posible el diseño de los modernos computadores dieron pie al desarrollo de aplicaciones software en diseño asistido por computador, gráficos, editores, etc., que han vuelto al laboratorio y a la fabri-

ca para potenciar el proceso de desarrollo y fabricación de nuevos circuitos. Y así constantemente.

4. REFLEXIONES FINALES SOBRE ELECTRÓNICA Y COMPUTACIÓN

Hace 50 años que Bardeen y Brattain descubrieron el transistor y con él la posibilidad de desarrollar hasta límites entonces insospechados el hardware de nuestras máquinas. Hace 17 años que Allen Newell escribió un trabajo sobre "el nivel de conocimiento", como un nivel adicional por encima del programa y de la Electrónica, en el cual se tienen que describir primero todos aquellos procesos que queremos hacer computacionales. Es decir, todos aquellos modelos que más tarde van a convertirse en algoritmos, estructuras de datos y programas en el "nivel de los símbolos" y finalmente, en configuraciones de niveles de tensión y corriente en miles de millones de transistores a los que llamamos microprocesador, memoria RAM, registros de desplazamiento o temporizador. Es decir, al *nivel físico* de toda computación.

Al lanzar la vista hacia atrás y comparar la evolución de los tres niveles de la computación (el nivel de conocimiento, el de los símbolos y el de los transistores -el físico-) nos parece curioso detectar que los

problemas se encuentran justo donde menos se pensaba hace medio siglo que deberían encontrarse. Es decir, el avance de la Electrónica integrada ha sido tal que ha dejado atrás a los otros dos niveles. Hoy tenemos más máquinas que modelos. De hecho hay un exceso de ingeniería electrónica junto a un clamoroso déficit de ingeniería del conocimiento. Para conseguir un avance armónico de los tres niveles nos parece evidente que el gran esfuerzo y el desafío de comienzos del próximo milenio deberá centrarse en desarrollar el modelado a nivel de conocimiento de aquellas tareas genuinamente humanas que deseemos hacer computables. Su "excelencia" el transistor y la tecnología electrónica a la que dio origen van de momento por delante.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a mi compañero, y sin embargo amigo, el Prof. Javier García Sanz, el haberme facilitado una copia del trabajo original de Bardeen y Brattain ("The Transistor, A Semi-conductor Triode") y las ilustraciones sobre la estructura original de los distintos transistores, tomadas de un trabajo de Ian Ros.

José Mira Mira
Dpto. de Inteligencia Artificial

COLABORACIONES CIENTÍFICAS DE OTRAS RAMAS DEL SABER

Ganivet y la reacción anti-científica del fin de siglo

1. LA CUESTIÓN DE LA CIENCIA EN LA EUROPA FINISECULAR

Al cumplirse este año el primer centenario de la muerte de Ángel

Ganivet¹, escritor granadino que ha sido denominado precursor de la Generación del 98, nos proponemos

¹ El suicidio de Ganivet en el río Dwina tuvo lugar en Riga, el 29 de noviembre de 1898, cuando el novelista contaba 32 años y ostentaba el cargo de cónsul español en Finlandia. A tan temprana edad, ya había publicado sus dos novelas (*La conquisista del reino de Maya* y *Los trabajos del infatigable creador Pío Cid*), así como su ensayo *Idearium español* y las colecciones de artículos periodísticos *Granada la bella*, *Cartas finlandesas* y *Hombres del norte*.

indagar la reacción detectada en un grupo de intelectuales europeos frente al avance científico y al enorme desarrollo tecnológico que se experimentó en las últimas décadas del siglo XIX, en íntima conexión con el afianzamiento de una economía capitalista de marcado carácter industrial. La distorsionada figura de Ganivet oculta una interesante y complejísima posición ante la ciencia y la tecnología de hace un siglo,