

Los orígenes de la revolución digital: la irrupción de las memorias de semiconductores

Ignacio Mártel

La historia de cómo la tecnología de los semiconductores se introdujo en el almacenamiento de la información en la década de 1960, cambiando el paradigma vigente hasta ese momento.

El período de tiempo que abarca poco más de una década, desde 1958 hasta 1970, fue extraordinariamente fructífero para la ciencia y la tecnología de los semiconductores y su aplicación en memorias. Comenzó con la invención del circuito integrado en 1958 y la comercialización en 1960 de los primeros dispositivos de memoria de semiconductores, los *flip-flops* que fabricaron Texas Instrument (SN 502) y Fairchild Semiconductors (Micrologic Type “F”). Posteriormente tuvo lugar un hecho trascendental: la fundación de Intel en 1966, el gigante de la tecnología microelectrónica; describiré los primeros pasos dados por la empresa para fabricar memorias de semiconductores de gran capacidad. El texto finaliza en 1970 con la comercialización del i1103, el primer chip de éxito de la empresa, que marcó el comienzo de la hegemonía de las memorias basadas en semiconductores y que supuso el final del dominio de las memorias basadas en ferritas —también conocidas como memorias de núcleo magnético—, al final de esa década.

Introducción

En el universo digital, se estima que en la actualidad hay más de 4×10^{22} bits (40 zettabits) de datos. Esto equivale a los datos almacenados en un billón (10^{12}) de Blu-rays. Cerca del 90 % de esos datos se han generado en la última década; cada día se crean 3×10^{15} bits (3 petabits) de nuevos datos, y esa cantidad no deja de crecer un año tras otro, lo que implica que cada vez necesitamos más dispositivos, con prestaciones siempre crecientes, capaces de guardarlos.

En nuestro día a día, damos por sentado que los dispositivos que almacenan esos datos siempre han estado ahí, ya que son tan habituales, económicos y eficientes que parece que nos acompañan desde tiempo inmemorial. Pero la realidad es que hemos recorrido un largo camino desde los primeros días de los dispositivos de almacenamiento basados en semiconductores. En este artículo analizo la historia de esos comienzos.

Los orígenes de las memorias de semiconductores

Como es bien sabido, la invención del transistor bipolar a finales de 1947 [1] supuso una verdadera revolución en el campo de la electrónica y, con el paso de los años, en la vida cotidiana [2]. Pocos años después de su aparición, se pusie-

ron claramente de manifiesto las ventajas de los dispositivos basados en semiconductores sobre las válvulas de vacío para su uso en ordenadores. Este proceso irreversible comenzó en 1953 con el Manchester TC (*Transistor Computer*), un prototipo de ordenador fabricado en la Universidad de Manchester, que utilizaba 92 transistores bipolares de punta de contacto y 550 diodos, tenía una capacidad de almacenamiento de 48 bits. El año siguiente, 1954, de la mano de los Bell Labs de AT&T, se fabricó el TRADIC (*TRAnsistor DIgital Computer*). Este equipo contenía cerca de 800 transistores que reemplazaron a las habituales válvulas de vacío y podía trabajar disipando una potencia inferior a 100 W, la vigésima parte de la necesaria para el funcionamiento de un ordenador de válvulas con prestaciones comparables.

Estos primeros diseños empleaban transistores discretos en pequeños circuitos de memoria de tipo *flip-flop*, que es el nombre común que se le da a un dispositivo de dos estados que sirve como memoria básica, ya que solo almacena un bit. Los *flip-flops* se utilizan habitualmente para el almacenamiento temporal y transferencia de datos binarios. En sus orígenes, esos circuitos se utilizaban como controladores y amplificadores de la memoria de núcleo magnético —también conocida como memoria de ferritas—, que empleaban los ordenadores de finales de la década de 1950 y principios de la de 1960.

Poco después, dos acontecimientos supusieron un salto de gigante en la tecnología de semiconductores: por una parte, la invención del circuito integrado casi simultánea en Texas Instrument (TI) y Fairchild Semiconductors [2,3] en 1958-59 y, por otra, la del transistor de efecto campo, el MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) en los Bell Labs [4] en 1960. Como veremos en los siguientes párrafos, ambos acontecimientos tuvieron una influencia decisiva en la aparición de las primeras memorias basadas en semiconductores.

Los primeros fabricantes de circuitos integrados pronto se introdujeron en este mercado. TI anunció en marzo de 1960 el “Circuito sólido SN 502”, un *flip-flop* [5, 6]. El circuito de TI, cuya imagen se muestra en la Figura 1, integraba 2 transistores, 4 diodos, 4 condensadores y 6 resistencias. TI lo presentó en Nueva York en marzo de 1960 y comercializó

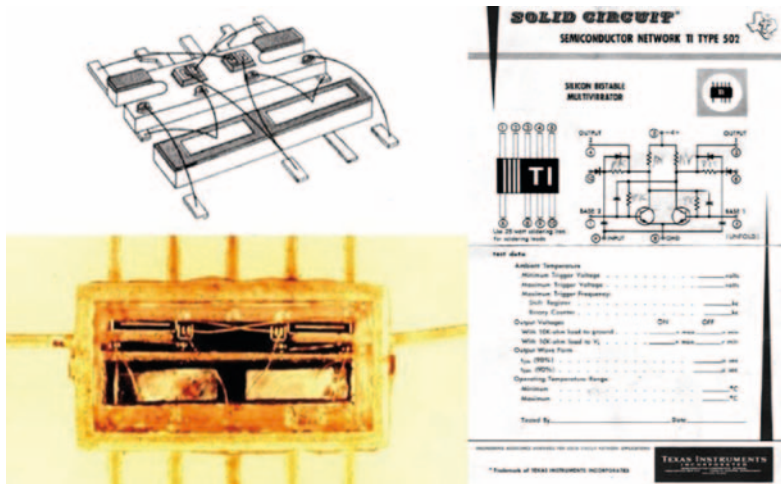
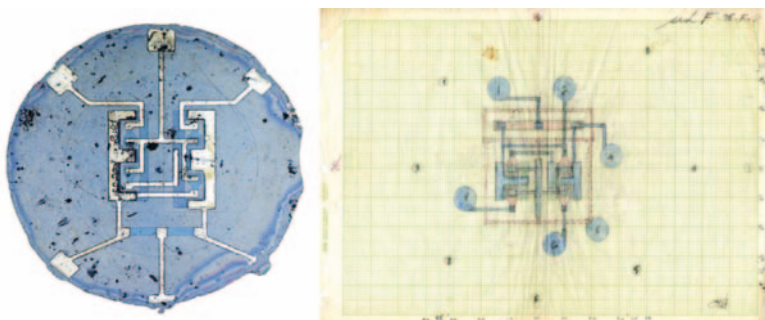


Figura 1. Izquierda: el SN 502 de TI, el primer chip comercial de esta compañía. Derecha: hoja de datos del SN 502. Cada unidad se probaba individualmente y los resultados de los test se escribían a mano en la hoja de datos (Computer History Museum/Texas Instrument/SN 502).

diez unidades hasta agosto de ese año. Los componentes de este circuito estaban aislados entre sí por zonas donde se había eliminado selectivamente el sustrato semiconductor mediante ataque químico, e interconectados entre ellos mediante hilos de oro muy finos, siguiendo la idea original de J. Kilby respecto a su invención del circuito sólido [3]. Se vendía al astronómico precio de 450 dólares la unidad —a precios de 2020, 3.500 euros; no obstante, la compañía decía que perdía dinero con cada dispositivo vendido.

Ese mismo año, Fairchild fabricó el Micrologic Type “F”, que fue el primer circuito integrado monolítico, de nuevo un *flip-flop* constituido por 4 transistores y 5 resistencias [7], fue el primer circuito integrado comercial propiamente dicho. Estaba fabricado con tecnología planar, siguiendo las ideas de la patente de Robert Noyce de lo que era el auténtico circuito integrado [8]. En ella, mostraba cómo se podía fabricar un circuito electrónico en una sola pieza de silicio utilizando un proceso de fabricación en la que las interconexiones entre los diferentes componentes del circuito se realizaban mediante depósitos de láminas delgadas de metales sobre un óxido térmico sobre el que se abrían ventanas localizadas en las regiones del contacto mediante fotolitografía. Se muestra en la Figura 2, junto con el diseño original de las máscaras que se necesitaban para realizar el circuito, dibujadas a mano en un papel milimetrado (!) [9].

Figura 2. Izquierda: Imagen del primer circuito integrado fabricado por Fairchild Semiconductors, el Micrologic Type “F”, el diámetro del dispositivo de la imagen es de 1.5 mm. Derecha: layout del circuito (Computer History Museum/Semiconductor Artifacts).



En la Figura 2, los transistores son las regiones características con forma de punta de nariz, en color azul brillante, situados hacia el centro de la imagen. Las resistencias son las tiras horizontales y verticales, también en tonalidades azules brillantes. Las líneas blancas son capas muy finas de aluminio que interconectaban los diferentes elementos del circuito entre ellos. Se conectaban con el mundo exterior mediante cables (no mostrados en la imagen) soldados a las seis almohadillas situadas en la periferia del dispositivo. Las manchas negras irregulares son imperfecciones existentes en la superficie del chip.

Estos primeros circuitos integrados contenían solo un bit de memoria y se utilizaron en los primeros ordenadores militares como el AC Spark Plug MAGIC, y el Martin MARTAC 420, que utilizaron numerosos circuitos Micrologic “F” adecuadamente encapsulados. Fueron también utilizados en el ordenador que llevaban los vehículos del programa Apollo, el Apollo Guidance Computer (AGC) de la NASA. Cada nave Apollo llevaba dos AGC que usaban Micrologic “F”. Uno estaba instalado en el Módulo de Comando y el otro en el Módulo Lunar. Al requerir el uso de unos 200.000 circuitos Micrologic “F”, el AGC fue el mayor usuario de circuitos integrados hasta 1965 [10]. Esta última fue una elección arriesgada, ya que la tecnología de semiconductores se consideraba no suficientemente probada en ese momento, pero era necesaria para cumplir con los requisitos de disponer de un sistema de peso y tamaños reducidos, condiciones absolutamente imprescindibles para las naves de la misión Apollo.

Como he indicado antes, los primeros circuitos integrados eran muy caros, razón por la que los ingenieros implicados los usaban en aplicaciones muy específicas, únicamente allí donde el tamaño reducido y el bajo consumo de energía eran primordiales. El Programa Apollo en particular y, en general, el sector aeroespacial, se ajustaba plenamente a estos requerimientos.

Casi simultáneamente al desarrollo del programa Apollo, Westinghouse se unió a TI para construir circuitos similares al SN 502 destinados al programa de misiles Minuteman II, un elemento clave del arsenal de EE. UU. durante la Guerra Fría y uno de los programas militares más costosos de la historia. El Minuteman II fue el primero de la serie en utilizar circuitos integrados [11].

Durante los primeros años de la década de 1960, fueron comercializándose los primeros chips de memoria basados en semiconductores: en 1965, la compañía Signetics, originaria de EE. UU., produjo una memoria RAM (*Random Access Memory*) de 8 bits utilizando transistores bipolares. En 1968, Fairchild Semiconductors montó dieciséis memorias estáticas de acceso aleatorio SRAM (*Static Random Access Memory*) de canal p-MOS de 64 bits cada una en un soporte cerámico

para componer una memoria de 1.024 bits para Burroughs Corporation, la empresa de fabricación de ordenadores más antigua de los EE. UU.

En 1965 aparecieron las primeras memorias no volátiles basadas en dispositivos discretos mediante el uso de diodos. Las primeras memorias ROM (*Read Only Memory*) de semiconductores se realizaron con matrices de diodos que se conectaban entre sí en placas de circuito impreso, en las que la presencia o ausencia de un diodo representaba un “1” o un “0”, respectivamente, tal y como se muestra en la Figura 3. Cuando esto pasó a realizarse de forma integrada, el último paso de fabricación consistía en la conexión (o su ausencia) a los diodos integrados en un único bloque de silicio.

En 1965, la compañía estadounidense Sylvania Electronic Components, produjo una ROM-TTL (*Transistor Transistor Logic*) con tecnología de transistores bipolares de 256 bits para los ordenadores de Honeywell. A principios de la década de 1970, varias compañías fabricantes de circuitos integrados (Fairchild, Intel, Motorola, Signetics, TI) ofrecían ROM bipolares de alta velocidad de 1.024 bits, mientras que otras como AMD, General Instrument, National, Rockwell producían dispositivos ROM con tecnología MOS de 4.096 bits. No obstante, las memorias ROM basadas en semiconductores no conocerían grandes éxitos comerciales hasta bien entrada la década de 1980.

En 1968, de nuevo Fairchild comercializó dispositivos DRAM (*Dinamic Random Access Memory*) de 1.024 y 2.048 bits. En pocos años, las memorias RAM de semiconductores dejarían obsoletas a las de núcleo magnético.

La fundación de Intel

El comienzo exitoso desde el punto de vista comercial de las memorias basadas en semiconductores coincide con la fundación en 1966 de Intel Corporation, compañía que en 1968 comenzó a vender un chip de memoria construido con semiconductores con 2.000 bits de memoria. La compañía fue fundada por Robert Noyce y Gordon Moore (Fig. 4), que habían trabajado en la década anterior con Wiliam Shockley [12] —uno de los inventores del transistor bipolar junto a John Bardeen y Walter Brattain—, por espacio de poco más de un año en Shockley Semiconductors, la primera empresa de semiconductores de Silicon Valley. Hartos del difícil trato con Shockley, dejaron la empresa y fundaron Fairchild Semiconductors en 1957, junto con otros seis científicos e ingenieros [13], a los que se conoce desde entonces como “los ocho traidores”.

A mediados de la década de 1960, mientras trabajaban en Fairchild y no estando satisfechos con la andadura de la empresa, Noyce y Moore tomaron la arriesgada decisión de separarse y establecer su propia empresa con el objetivo específico de hacer

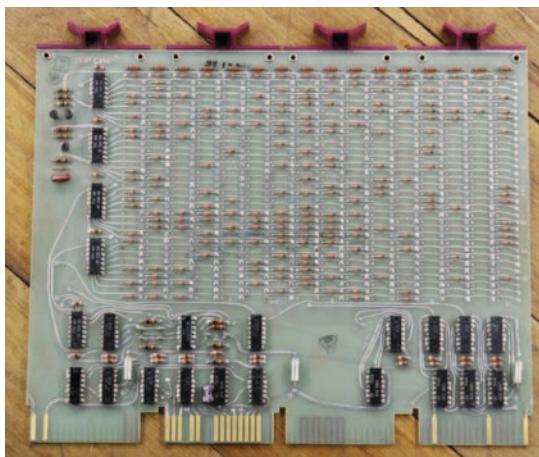


Figura 3. Placa base de una memoria ROM PDP-11 con la matriz de diodos. El dispositivo se fabricó en la década de 1970. Cada bit está representado por la presencia o ausencia de un diodo (Reddit/Electronics/Floppy Disk PDP-11).

memorias de semiconductores, pues pensaban que sustituir las memorias de ferritas por otras basadas en semiconductores aumentaría la capacidad de almacenamiento y la velocidad. Esa empresa se llamó Intel (acrónimo de *International Electronics*) y, como el tiempo se encargó de demostrar, fue una apuesta audaz y un éxito prodigioso [2]. Gordon Moore fue CEO de Intel entre 1975 y 1987 y presidente de 1979 a 1997. Moore es famoso por su muy conocida “Ley de Moore” [14]; como ya hemos visto, Robert Noyce fue uno de los padres del circuito integrado y, en años posteriores, supervisó la invención de Ted Hoff del microprocesador, que fue su segunda gran aportación a la tecnología microelectrónica. Murió en 1990.

Intel se fundó con una inversión inicial de 2,5 millones de dólares [15]. Durante el primer año de existencia, su facturación apenas llegó a 3.000 dólares; en 1973 superaron los 60 millones y en el año 2000 ya facturaba 30.000 millones de dólares. Ha sido el líder mundial de ventas de circuitos integrados entre los años 1984 y 2016 y ha vuelto al liderato en 2019, tras ser superada por Samsung en 2017 y 2018; hoy en día, la empresa tiene un valor en bolsa cercano a los 300.000 millones de dólares.

Figura 4. Robert Noyce (izquierda) y Gordon Moore (derecha) delante del edificio de Intel en Santa Clara, California, en 1970 (*Encyclopaedia Britannica/Intel/Noyce Moore*).



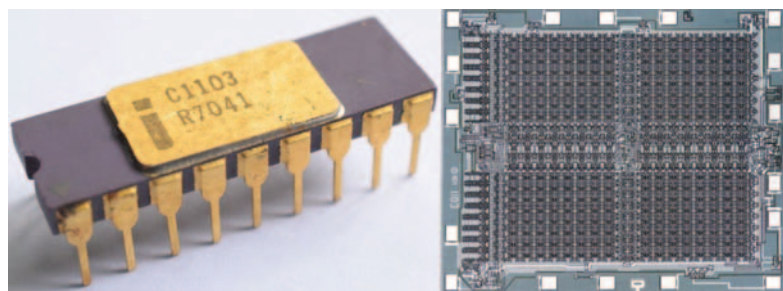


Figura 5. Izquierda: El i1103 encapsulado. Derecha: dentro de i1103 (Intel Museum Silicon Valley History/Intel 1103 DRAM Memory Die).

El “bombazo” de Intel: el i3101

El primer producto exitoso de la compañía fue la memoria i3101, construida con transistores bipolares, una memoria SRAM de 64 bits, introducida en 1969. En 1970 introdujeron en el mercado el Intel i1103, chip que contenía 1.024 bits, con 3.072 transistores MOSFET. El i1103 fue el primer circuito integrado de memoria DRAM disponible comercialmente en el mundo; sus principales características eran su bajo precio (0,01 \$/bit) y reducido tamaño. Cuando se introdujo, los rendimientos iniciales de producción eran pobres (de media se obtenían tan solo dos chips funcionales por cada oblea) y no fue hasta el quinto rediseño de las máscaras de producción, en 1971, cuando se obtuvieron rendimientos aceptables, lo que permitió disponer de él en grandes cantidades [16].

Se fabricó mediante una tecnología p-MOS de seis máscaras de litografía con puerta de polisilicio con una longitud del canal del MOSFET de 8 μm . El circuito resultante tenía un tamaño de celda de memoria —integrada cada una de ellas por tres transistores y un condensador—, de 2.400 μm^2 ; el circuito completo tenía un tamaño justo por debajo de los 10 mm² ($2,85 \times 3,5 \text{ mm} = 9,97 \text{ mm}^2$ [Fig. 5]) y cada unidad se vendía a 21 dólares —120 euros de 2020— [15]. El primer ordenador comercial que usó el i1103 fue el HP 9800.

El i1103 se convirtió en el primer chip de memoria de semiconductores en desafiar seriamente la hegemonía de las memorias de ferritas. Fue un punto de inflexión en la historia del circuito integrado: por primera vez, se podía almacenar una cantidad significativa de información en un solo chip de tamaño muy reducido. Comenzó a reemplazar a las memorias de ferritas y su uso en la industria de los ordenadores se generalizó rápidamente; de hecho, en 1972 fue el dispositivo semiconductor más vendido en el mundo. El i1103, según los estándares actuales, era un dispositivo primitivo: era lento, difícil de fabricar y delicado de operar. Pero demostró que las memorias de semiconductores no solo eran viables, sino que representaban una gran mejora con respecto a las memorias de ferrita, y aumentaba enormemente las prestaciones de los ordenadores que las empezaron a utilizar.

La rápida evolución de la tecnología MOS permitió fabricar memorias DRAM de 4 Kbit en 1973 y de

16 Kbit en 1974. Para finales de la década de 1970 ya se habían comercializado memorias de 64 Kbit; todas ellas fiables, más rápidas y más económicas que las memorias basadas en ferritas. El mundo del almacenamiento de datos había cambiado para siempre. En la actualidad las memorias basadas en semiconductores tienen una densidad de almacenamiento de datos que ronda los 1,3 Tbit/cm², lo que significa billones (10^{12}) de transistores en pocos milímetros cuadrados de superficie.

Un comentario final

Se ha dicho en el punto anterior que el i1103 fue la primera memoria DRAM basada en semiconductores. Es muy frecuente encontrar en la bibliografía científica comentarios del estilo “El primer dispositivo que hacía tal cosa”; esto merece una aclaración. Como ya hemos visto al principio de este artículo, durante la década de 1960 se hicieron multitud de pruebas en numerosos laboratorios y empresas con la tecnología de los circuitos integrados, de aparición reciente en aquellos años. En este sentido, el i1103 no fue el primer circuito integrado de memoria de semiconductores, fue más bien el *primer dispositivo comercial exitoso* de tales características. La virtud de Intel fue ser capaz de aglutinar en la compañía el “know-how” proveniente de otras compañías del sector —especialmente de Fairchild, de donde venían sus fundadores—, junto con las propias innovaciones desarrolladas en la compañía en lo que se refiere al diseño, a los avances en las tecnologías de fabricación y a la “osadía” y audacia de poder materializar todas estas capacidades y habilidades en unos productos comerciales más potentes, más baratos y más rápidos que todos los existentes hasta ese momento. Cuando Intel hizo todo eso, tenía menos de 200 empleados.

Referencias

- [1] J. BARDEEN y W. H. BRATTAIN, “The Transistor, A Semi-Conductor Triode”, *Phys. Rev.* 74, 230 (1948); W. H. BRATTAIN y J. BARDEEN, “Nature of the Forward Current in Germanium Point Contacts”, *Phys. Rev.* 74, 231 (1948),
- [2] I. MÁRTIL, *Microelectrónica. La historia de la mayor revolución silenciosa del siglo xx* (Ediciones Complutense, Madrid, 2018).
- [3] J. S. KILBY, “Invention of the Integrated Circuit”, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-23, 648 (1976), DOI: 10.1109/T-ED.1976.18467
- [4] D. KAHNG y M. M. ATALLA, “Silicon-silicon Dioxide Field Induced Surface Devices”, IRE-AIEE Solid-State Device Res. Conf. (Carnegie Inst. of Technol., Pittsburgh, PA), 1960. Para la historia de la invención del MOSFET, ver D. KAHNG, “A Historical Perspective on the Development of MOS”, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-23, 655 (1976).
- [5] COMPUTER HISTORY MUSEUM, “Texas Instruments Type 502 ‘Solid Circuit’” [<https://www.computerhistory.org/revolution/artifact/276/1415>].

- [6] C. PHIPPS, "The Early History of ICs at Texas Instruments: a Personal View", *IEEE Annals of the History of Computing* 34, 37 (2012).
- [7] R. NORMAN, J. LAST y I. HAAS, "Solid-state micrologic elements", 1960 IEEE International Solid-State Circuits Conference, *Digest of Technical Papers*, Feb. 1960.
- [8] R. NOYCE, "Semiconductor device-and-lead structure", Patente US 2981877, fecha de solicitud: 30 de julio de 1959, fecha de aprobación: 25 de abril de 1961.
- [9] D. A. LAWS y M. RIORDAN, "Making Micrologic: The Development of the Planar IC at Fairchild Semiconductor, 1957-1963", *IEEE Annals of the History of Computing* 34, 20 (2012).
- [10] D. SPICER, "One Giant Leap: The Apollo Guidance Computer", 12 de agosto de 2000 (<http://bit.ly/2vLEMiW>). El ordenador de a bordo del programa Apolo, Apollo Guidance Computer (AGC), utilizaba una memoria de núcleos de ferrita cableados para almacenar los programas de vuelo (lo que hoy denominaríamos la ROM) y una memoria de núcleos magnéticos distribuidos en forma de matriz para guardar la memoria dinámica, lo que denominaríamos la RAM. El AGC usaba 36 K palabras de 16-bit en su memoria de núcleos cableados, contenida en un volumen de $61 \times 32 \times 15 \text{ cm}^3$ (aproximadamente, un pie cúbico) y 4 K palabras de memoria de núcleos magnéticos. Utilizó también el Micrologic Type "F" para los circuitos lógicos.
- [11] COMPUTER HISTORY MUSEUM, "ICs Rocket to Success" (<https://www.computerhistory.org/revolution/digital-logic/12/278>).
- [12] G. GONZÁLEZ e I. MÁRTIL, "Mi clásico favorito: Wiliam Bradford Shockley", *Rev. Esp. Fís.* 31, 1887 (2017). Véase también el libro que describe con más detalle la historia de la invención del transistor en los Bell Labs: M. RIORDAN y L. HODDESON, *Crystal Fire: The Birth of the Information Age* (W. W. Norton, Nueva York, 1997).
- [13] G. E. MOORE, "The role of Fairchild in silicon Technology in the Early Days of Silicon Valley", *Proceedings of the IEEE* 86, 53 (1998).
- [14] G. E. MOORE, "Cramming more components onto integrated circuits", *Electronics Magazine* 38, 114 (1965). Moore publicó este famoso artículo cuando era Director del Research and Development Laboratorie en Fairchild Semiconductor.
- [15] SILICON VALLEY HISTORICAL ASSOCIATION, "Intel History" (<https://www.siliconvalleyhistorical.org/intel-history>).
- [16] B. LOJEK, *History of Semiconductor Engineering* (Springer Science & Business Media, Berlín, 2007).

Ignacio Mártil

Dpto. de Estructura de la Materia,
Física Térmica y Electrónica
Facultad de Ciencias Físicas.
Universidad Complutense de Madrid



¿te gusta investigar?

ATI

La solución adecuada a cada instalación

Suministro de equipamiento para investigación

* alimentación HV-LV * crates de alimentación * racks * electrónica de control y adquisición * espectroscopia * detectores (silicio, HPGe, centelleadores, Cd/Zn/Te...) * cables y accesorios * gestión de adquisiciones

info@atisistemas.com