

Agradecimientos

Me gustaría expresar mi más profunda gratitud a mis compañeros y amigos del Instituto de Microelectrónica de Sevilla (IMSE) y del Departamento de Electrónica y Electromagnetismo de la Universidad de Sevilla (US). Estoy en deuda especialmente con mis mentores, los profesores Belén Pérez Verdú y Ángel Rodríguez Vázquez, con quienes comencé mi andadura en este mundo de la investigación, primero como alumno colaborador y luego como estudiante de doctorado. He aprendido muchas cosas de ellos, no solo relacionadas con la temática de este libro, sino también otros valores y habilidades que he puesto en práctica a lo largo de mi vida.

Desde mis comienzos, como para la mayoría siempre inciertos, tuve la inmensa fortuna de desarrollar mi investigación en un centro puntero, dirigido por José Luis Huertas Díaz, profesor de profesores y pionero de la microelectrónica en España, por quien siento una gran admiración, respeto y cariño. A Huertas le sucedió en el cargo Santiago Sánchez Solano; a él le debemos el enorme esfuerzo de transformar nuestro instituto en un centro mixto del CSIC y la US, que actualmente dirige Bernabé Linares Barranco, donde tengo el privilegio y honor de ser vicedirector. También estoy en deuda con mis estudiantes, de quienes he aprendido más de ellos que ellos de mí. Mi aportación científica, si tiene algún valor,

es gracias a la dedicación y genialidad de todas estas personas maravillosas.

Quisiera agradecer también al CSIC, y muy especialmente a Pilar Tigeras, por animarme a escribir este libro, y a Carmen Guerrero, por su apoyo durante todo el proceso de edición. Por supuesto, no puedo olvidarme de los comentarios valiosos y sugerencias de los evaluadores, que espero que haya sabido reflejar en el texto final, así como a la editorial Los Libros de la Catarata, y en especial a Carmen Pérez, por ayudarme a transformar el manuscrito inicial en un texto divulgativo que pueda ser ampliamente accesible a nuestra sociedad, a la que me debo como servidor público.

Además de todas estas grandes personas, mi trabajo siempre ha sido financiado por un gran número de proyectos de investigación e industriales, tanto nacionales como internacionales. Más recientemente, mi investigación está financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España y de la Consejería de Economía, Conocimiento, Empresas y Universidad de la Junta de Andalucía (con el apoyo del Fondo Europeo de Desarrollo Regional) a través de los proyectos CORDION (PID2019-103876RB-I00), COGNITIO (PY20_00599) y NEURO-RADIO (US-1260118).

Por último, mi más caluroso agradecimiento a mi familia. Sin su cariño, paciencia y apoyo nada de esto hubiera sido posible. ¡Muchas gracias por todo, mis amores!

Prólogo

Nos encontramos en los albores de la mayor revolución tecnológica que ha conocido la humanidad. Los primeros años del siglo XXI serán recordados por la popularización de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) y de dispositivos y aplicaciones como teléfonos móviles, *tablets*, ordenadores personales, etc., que nos permiten acceder a la información a través de internet de una forma ubicua, con velocidades de transferencia de datos que pueden llegar a superar los gigabits por segundo (Gbps), gracias a las últimas generaciones de comunicaciones móviles.

Esta transformación social sin precedentes se debe en gran medida al espectacular desarrollo experimentado por la microelectrónica y los chips. Estos *microingenios* han evolucionado en los últimos 50 años de una forma exponencial, según la ley de Moore, y hoy es posible fabricar chips que contienen componentes cuyo tamaño es de unos pocos nanómetros. Lejos de frenarse, las tecnologías microelectrónicas continúan acelerándose y ya es posible la integración de miles de millones de componentes fabricados a una escala próxima al átomo, lo que, entre otros beneficios, posibilita la convergencia de ramas muy diversas de la ciencia y de la ingeniería hacia nuevos campos de conocimiento, aplicaciones y servicios.

Una de las consecuencias de este escalado es una mayor *inmersión* de la microelectrónica en objetos de uso cotidiano, dotándolos de un alto grado de conectividad e interacción con su entorno, dando así lugar a lo que se ha denominado *internet de las cosas* o *IoT* (de *internet of things*). El paradigma IoT supone la interconexión de miles de millones de entidades (o cosas) *ciberfísicas*, es decir, objetos con una estructura híbrida *software/hardware*, capaces de comunicarse entre ellos sin necesidad de intervención humana (comunicación máquina-máquina). La educación a través de plataformas de enseñanza virtual, la teleasistencia sanitaria personalizada, las operaciones bursátiles automatizadas, las redes energéticas inteligentes, la robotización en procesos industriales y en el transporte, la asistencia basada en inteligencia artificial en dispositivos portátiles o los vehículos autónomos son solo algunos ejemplos de IoT que están empezando a ser utilizados con éxito.

La electrónica es una de las tecnologías habilitadoras que hace posible el desarrollo de tecnologías como la computación distribuida en la nube (*cloud computing*), *big data*, la inteligencia artificial, la biotecnología y la nanotecnología, por citar solo algunas de las tecnologías *disruptivas* que están conformando nuestro modo de vida en lo que se ha venido en llamar la *cuarta revolución industrial* o la *sociedad 4.0*.

Sin embargo, a pesar de la cada vez mayor imbricación de todos estos avances científico-tecnológicos, su desarrollo sucede tan rápidamente que apenas da tiempo a utilizarlos cuando son superados por nuevas generaciones de dispositivos que mejoran sus prestaciones. Más aún, se está produciendo un fenómeno paradójico: el alejamiento del conocimiento científico y tecnológico por parte de la ciudadanía en general, mientras hace un uso exhaustivo, sobre todo de la tecnología, en su vida cotidiana y para su bienestar diario.

En este escenario, este libro pretende ofrecer al lector no especializado una descripción de los conocimientos básicos esenciales para poder comprender la tecnología que hace posible todos los avances que utilizamos en nuestro día a día. No

se pretende dar una explicación exhaustiva ni excesivamente académica, pero sí ofrecer una visión lo más completa y rigurosa posible de la micro y nanoelectrónica, de sus principios y componentes esenciales, sus principales aplicaciones, así como los retos y tendencias que se nos presentan en el futuro a corto y medio plazo.

Con este objetivo, el libro se estructura en cinco capítulos. La primera parte, que comprende los capítulos 1 a 3, presenta una exposición de los fundamentos que los lectores deben conocer para comprender los principios básicos sobre los que se sustentan la microelectrónica y sus aplicaciones. Aunque se comienza haciendo un breve recorrido histórico de los principales hitos que marcaron sus comienzos, estos aspectos —así como otros relativos a los fundamentos— no son tratados en demasiado detalle¹.

La segunda parte del libro, correspondiente a los capítulos 4 y 5, ofrece una mirada al presente y al futuro de la tecnología, centrándose en los cambios que se están produciendo como consecuencia de la evolución de la micro a la nanoelectrónica, desde los materiales y dispositivos emergentes hasta las técnicas de fabricación, que requieren la manipulación de la materia a escala atómica. Como conclusión, se hará especial énfasis en el papel que la micro y nanoelectrónica están jugando en el desarrollo de algunas de las tecnologías disruptivas que están produciendo la denominada *transformación digital*.

Es posible que algunos pasajes del libro resulten un poco complicados para aquellos lectores no tan familiarizados con la ciencia, y más concretamente con la electrónica. Aun así, los animo a que sigan leyendo y, en todo caso, si tienen curiosidad e interés por profundizar más, espero que la bibliografía complementaria los ayude a satisfacer su curiosidad. También

1. El lector interesado puede consultar otras obras de divulgación sobre microelectrónica que tratan estos aspectos, como por ejemplo, los libros: G. Huertas, L. Huertas, J. L. Huertas (2015): *Del electrón al chip*, CSIC-Los Libros de la Catarata; I. Mártel (2018): *Microelectrónica. La historia de la mayor revolución silenciosa del siglo XX*, Ediciones Complutense.

puede ocurrir el efecto contrario. Es decir, algunos lectores pueden encontrar algunas partes excesivamente básicas e incluso un tanto imprecisas debido a la adaptación de los contenidos a un público general. Desde ya, pido disculpas por esas imprecisiones, que a mi juicio son parte del precio que ha de pagarse cuando se transita del mundo de la enseñanza universitaria y la investigación a la divulgación.

En cualquiera de las situaciones en la que el lector se encuentre, espero que el libro sirva para este fin divulgativo, en este apasionante *micro/nanomundo* que hay dentro de los chips y sus innumerables aplicaciones, que son la base de nuestra *sociedad digital*. Esta ha sido la motivación que me llevó a escribirlo y confío en que disfruten de su lectura tanto como yo lo he hecho durante su redacción.

José M. de la Rosa
Sevilla, mayo de 2021