

LIBRO ELECTRÓNICA DIGITAL. APLICACIONES Y PROBLEMAS CON VHDL

José Ignacio Artigas, Luís Ángel Barragán, Carlos Orrite e Isidro Urriza

*Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Universidad de Zaragoza. e-mail jiartigas@unizar.es*

RESUMEN

El libro que se presenta en este documento pretende que los problemas sean un instrumento para que el lector adquiera la capacidad de análisis funcional, eléctrico y temporal de los circuitos digitales, además de introducirle en el diseño de circuitos digitales con dispositivos lógicos programables (PLD) utilizando VHDL y las herramientas de diseño actuales. Son muy escasos los libros con esta orientación en la bibliografía actual, ya que la mayoría plantean problemas de sistemas lógicos, en los que los componentes son genéricos y están desprovistos de todo detalle tecnológico. Al principio de cada capítulo se realiza una introducción a modo de guía de estudio, con los conceptos fundamentales y al final del libro se incluye un apéndice de VHDL.

1. INTRODUCCIÓN

El libro “Electrónica digital. Aplicaciones y problemas con VHDL” [1] es el resultado de varios años de experiencia docente de los autores en asignaturas de electrónica digital en las titulaciones de Ingeniería del Centro Politécnico Superior de la Universidad de Zaragoza.

Su origen se remonta a otro libro de los mismos autores editado en la Universidad de Zaragoza [2], en el que se utilizaba el lenguaje ABEL, y que ya fue presentado en el congreso TAEE’2000 [3]. En dicho congreso quedó patente la demanda de un libro de estas características, pero que utilizase VHDL en lugar de ABEL. Los autores recogieron la invitación y el resultado es la obra que aquí se presenta, que además de utilizar VHDL incluye dos capítulos nuevos y se han revisado los restantes, suprimiendo muchos problemas y añadiendo otros nuevos.

Recopila gran parte de los problemas que se resuelven en clases prácticas, así como de los exámenes. Nuestros estudiantes, a través de las consultas y de su interacción en clase, han influido decisivamente en la forma de exponer las soluciones. En su elaboración también ha sido importante la experiencia obtenida a través de la participación en el desarrollo e implementación de circuitos digitales para distintos proyectos industriales.

2. OBJETIVOS

Este libro está orientado para todos aquellos que quieran diseñar y construir circuitos digitales reales. El primer objetivo de este libro, aparte del posible interés particular de alguno de los esquemas propuestos, es que los problemas sirvan como instrumento para que el lector adquiera la capacidad de análisis funcional, eléctrico y temporal de los circuitos digitales. Un diseñador debe manejar correctamente cronogramas, parámetros temporales y eléctricos de los circuitos integrados, así como unidades y órdenes de magnitud de dichos parámetros.

Otro objetivo perseguido es la introducción al diseño digital y despertar el sentido crítico del lector respecto a las soluciones presentadas. Por otra parte, el fuerte avance experimentado por los dispositivos lógicos programables (PLD), así como las múltiples

ventajas que éstos ofrecen sobre el diseño basado exclusivamente en circuitos estándar SSI y MSI, nos ha llevado a poner especial énfasis en el diseño de circuitos digitales con PLD, desde SPLD hasta FPGA.

Para ilustrar los principios básicos del modelado de circuitos digitales se ha introducido el lenguaje de descripción de hardware (HDL) VHDL. Aunque existen otros HDL, hemos elegido VHDL por varias razones: es un estándar IEEE; existen buenas referencias bibliográficas para el estudiante [4-7]; y, además, es un lenguaje admitido por casi todas las herramientas de diseño, como, por ejemplo, los sistemas de evaluación ofrecidos gratuitamente por varios fabricantes de PLD como ispLEVER Starter de Lattice o ISE WebPACK de Xilinx. En el libro se utilizan estas herramientas para simular y sintetizar los diseños.

Pretende ser un libro para el estudio de la electrónica digital dentro de las carreras de Ingeniería, aunque, dada la forma en que ha sido elaborado, puede utilizarse en cualquier titulación y, en general, puede resultar de interés para todos aquéllos que desean reforzar y ampliar sus conocimientos en esta materia. Está orientado a cursos intermedios y avanzados, donde el estudiante ya se encuentra familiarizado con conceptos básicos de electrónica digital y de sistemas lógicos, y se pretende llevar a la práctica dichos conceptos en problemas reales. Cubre multitud de temas con una profundidad razonable, aunque el profesor puede seleccionar y eliminar algunos de los apartados para adaptarlo a las necesidades concretas de cada programa.

3. METODOLOGÍA

Llegados a este punto, nos podemos plantear la siguiente pregunta: ¿Es necesario o, incluso, es conveniente que un estudiante estudie con un libro de problemas resueltos? Somos conscientes de que la forma más eficaz de aprender electrónica digital, como cualquier materia práctica, no es viendo cómo otros han resuelto determinados problemas, sino trabajándolos uno mismo. Por tanto, los problemas resueltos no se deben usar únicamente para leerlos después de haber estudiado la teoría correspondiente. Que un estudiante comprenda problemas resueltos por otras personas, e incluso que le parezcan asequibles, sencillos, lógicos, no significa que él sea capaz de resolver un problema parecido, como tantas veces se demuestra en las evaluaciones. Es necesario que el estudiante se enfrente a los problemas e interiorice las herramientas y los métodos más adecuados para su resolución. Se trata de un proceso de aprendizaje que requiere realizar un trabajo personal de resolver problemas, cada vez con menos ayuda de libros o del profesor.

De esta forma, vemos dos formas básicas de usar este libro de problemas. Por una parte, el libro ofrece una solución comprobada de los problemas propuestos, que puede ser usada por el estudiante para contrastar su solución propia. Por otra parte, la solución propuesta en el libro se puede usar como guía en el trabajo del estudiante. Muchos problemas empiezan con un apartado donde se dan las ideas básicas de la resolución del problema, en muchos casos con un diagrama de bloques intuitivo. A continuación, los siguientes apartados desarrollan en detalle cada aspecto del problema. El apartado inicial se puede usar como una guía a partir de la cual el estudiante puede desarrollar el problema. Y en el desarrollo, el estudiante puede acudir a los apartados que necesite cuando se atasque en la resolución. De esta forma se favorece un aprendizaje desde el hacer, sirviendo el libro como ayuda cuando el estudiante lo necesita.

Para favorecer el trabajo personal del estudiante, al final de muchos problemas se incluye un apartado de modificaciones propuestas. Pretenden que el estudiante profundice sobre algún aspecto del problema que se acaba de resolver.

Capítulo	Nº problemas	Nº páginas
Consideraciones eléctricas y temporales en la interconexión de circuitos integrados	17	52
Circuitos con dispositivos lógicos programables	10	45
Memorias	10	59
Conversores A/D y D/A	8	36
Interfaz con microcontroladores	8	48
Codificación y aritmética digital	5	52
Aplicaciones de sistemas digitales	8	84
El lenguaje VHDL	—	24
TOTAL	66	400

Tabla 1. Contenidos del libro

Queremos destacar que algunos problemas se pueden utilizar como prácticas de laboratorio de electrónica digital. En particular, se están usando como prácticas la lectura de un teclado matricial, el control de un motor paso a paso y el voltímetro digital. Para el motor paso a paso [8] y el voltímetro digital [9] se han desarrollado placas de circuito impreso que simplifican la realización de la práctica. Los esquemas y diseños de las placas están disponibles.

Una cuestión siempre problemática al plantear un texto técnico en castellano es cómo compatibilizar las normas del idioma, formalmente reguladas por la Real Academia Española, con el lenguaje utilizado en el mundillo técnico, que constituye una jerga aparte. Se ha procurado mantener la claridad del texto como primer objetivo, aun sacrificando el rigor gramatical. Con esta idea, se han utilizado algunos términos como *drenador*, en lugar del lingüísticamente correcto *drenaje*. Respecto a los términos en inglés, en algunos casos se ha optado por no traducirlos, ya sea porque su traducción convertiría una palabra en una frase, dificultando la comprensión, ya sea porque la terminología inglesa está más extendida; ejemplos de estos casos son los términos *buffer*, *driver*, *fanout*, *pull up*, *pull down*, *reset*, entre otros. En todo caso, se ha procurado poner en cursiva los términos ingleses que aparecen en el texto.

4. CONTENIDOS

El libro consta un total de 412 páginas que incluyen 66 problemas, distribuidos en 7 capítulos, además de un apéndice de VHDL que se centra en el modelado de circuitos digitales y en la realización de entornos de test.

El grado de dificultad de los problemas es creciente. La solución de los problemas se ha dividido en apartados para facilitar la comprensión de manera gradual. A pesar de que en algunos problemas se utiliza un determinado circuito integrado, no se adjuntan sus hojas de características técnicas como tal, sino que en el enunciado se presentan aquellos parámetros técnicos, extraídos de las hojas de características, que resultan necesarios para la resolución del problema, al igual que los cronogramas o diagramas de bloques si fuera necesario. Además, se ha considerado conveniente añadir al principio de cada capítulo una pequeña introducción recordando los conceptos fundamentales que serán necesarios en ese capítulo. Se trata de unos resúmenes que, además, pueden servir como guía de estudio al estudiante.

A continuación se describen someramente los contenidos de cada capítulo.

4.1. Consideraciones eléctricas y temporales en la interconexión de circuitos integrados

En este primer capítulo se abordan problemas de interconexión entre circuitos integrados digitales de la misma o distinta familia lógica; y entre comparadores y circuitos integrados digitales. En su resolución se utilizan parámetros eléctricos y temporales sacados de las hojas de características de los fabricantes. Se analiza la conectividad con distintas estructuras de salida: *totem-pole*, colector abierto y triestado. Por otra parte, se hace especial énfasis en el análisis temporal de circuitos digitales síncronos y se introduce el problema de la metaestabilidad.

4.2. Circuitos con dispositivos lógicos programables

En este capítulo se presentan problemas en los que se han de implementar circuitos digitales en dispositivos lógicos programables. Los diseños se realizan en VHDL con el objetivo de que el lector interiorice la necesidad de realizar una codificación orientada al *hardware*, pensando en puertas y biestables, y no en variables y funciones, como ocurre en los lenguajes de programación tipo C. Los diseños de este capítulo son lo bastante sencillos, de forma que se pueden encajar en SPLD como el 22V10 o en CPLD de pocas macroceldas.

4.3. Memorias

Aquí se analizan distintos tipos de memorias desde un punto de vista funcional, sin entrar en su implementación a nivel de transistor. Se describen los cronogramas de las memorias ROM, RAM estáticas (SRAM) y RAM dinámicas (DRAM), tanto asíncronas como síncronas. Se resuelven problemas de implementación de mapas de memoria y se realizan cálculos sobre velocidades de transferencia según los patrones de acceso. Uno de los objetivos de este capítulo es que el lector utilice los cronogramas de las memorias para ser capaz de integrar una determinada memoria en un sistema más complejo. Para ello se presenta el diseño de una memoria LIFO con una SRAM y un CPLD; se implementa una memoria FIFO en una FPGA a partir de memorias SRAM de doble puerto; etc. En este capítulo se ilustran las posibilidades de las herramientas de síntesis para comprobar las restricciones temporales de cada diseño.

4.4. Conversores A/D y D/A

Este capítulo está dedicado a los conversores analógicos-digitales y digitales analógicos. Se introduce la problemática de la cuantificación y el muestreo y se describen los distintos tipos de conversores actuales. En los problemas se hace especial énfasis en la interconexión de éstos con otros circuitos integrados, aunque también se ilustra la implementación de algunos conversores A/D: conversor A/D de aproximaciones sucesivas a partir de un conversor D/A; conversor de doble rampa de integración a partir de la circuitería analógica necesaria (integrador basado en amplificador operacional, comparador e interruptores); y conversor sigma-delta. Para simular el funcionamiento del conversor en estos dos últimos problemas, se ilustra como modelar en VHDL un entorno de test con circuitería analógica, resolviendo sus ecuaciones en diferencias con paso de simulación fijo.

4.5. Interfaz con microcontroladores

Este es un capítulo completamente nuevo respecto del libro anterior [2]. Se centra en la interconexión de los microcontroladores con otros circuitos, especialmente memorias,

analizando las especificaciones temporales. También, se plantea el diseño en PLD de alguno de los periféricos que incorporan los microcontroladores.

4.6. Codificación y aritmética digital

Este también es un capítulo completamente nuevo. Aborda los aspectos relacionados con el diseño de sistemas digitales que realizan operaciones aritméticas. Se repasa la codificación binaria de enteros y reales, tanto en coma fija como en coma flotante, y se ilustra el modelado en VHDL de las operaciones aritméticas básicas. Además, se introducen códigos de detección y corrección de errores (paridad, códigos de Hamming y CRC). Los problemas son de mayor complejidad que los anteriores. Se diseña un oscilador digital en coma fija capaz de sintetizar dos frecuencias distintas; se diseñan coprocesadores para multiplicación en coma flotante, tanto con multiplicador combinacional como secuencial; y los últimos problemas implementan códigos de detección y corrección de errores.

4.7. Aplicaciones de sistemas digitales

En este último capítulo se incluyen diseños de sistemas digitales más complejos que en los anteriores. El diseñador de sistemas digitales tiene que dominar las técnicas de análisis temporal, eléctrico y modelado digital que se introdujeron por separado en los capítulos anteriores, y aplicarlas conjuntamente cuando se enfrenta a un nuevo diseño. Por ello, en este capítulo se engloban muchos de los conceptos introducidos en los capítulos anteriores, conceptos que por su importancia capacitan al lector para la resolución de aplicaciones reales de sistemas digitales.

A diferencia de los problemas que aparecen en los capítulos anteriores, en las soluciones propuestas se utilizan circuitos integrados de los que no se adjuntan sus hojas de características técnicas, ni se presentan en el enunciado los parámetros técnicos que resultan necesarios para la resolución del problema. El enunciado del problema presenta únicamente las especificaciones del diseño a nivel funcional. La inclusión de información adicional podría influenciar el modo de resolver el problema por parte del lector. Queremos recalcar que la solución presentada no es la única.

La solución de los problemas se ha dividido en apartados para facilitar la comprensión de manera gradual. Se utiliza una metodología de diseño modular descendente. Se comienza con una representación funcional del diseño como caja negra. Ésta se divide en bloques interconectados entre sí (diagrama de bloques), en el que cada bloque tiene una determinada función. El proceso de diseño es un proceso iterativo, en el que a cada bloque se le van añadiendo más detalles estructurales hasta que se alcanza una descripción estructural usando circuitos integrados estándar, PLD, etc.

4.8. El lenguaje VHDL

En este apéndice se introducen los conceptos básicos del lenguaje VHDL. No se pretende realizar una discusión detallada y exhaustiva de todas sus características, sino familiarizar al lector con este lenguaje, permitirle entender los diseños descritos en VHDL a lo largo del libro y capacitarle para realizar diseños con él.

VHDL no es un lenguaje de programación, por ello, conocer su sintaxis no implica necesariamente saber diseñar con él. VHDL es un lenguaje de descripción de hardware genérico, que permite describir tanto circuitos síncronos como asíncronos; sin embargo, en

este libro nos centramos en los circuitos síncronos. Para describir circuitos síncronos deberemos:

- pensar en puertas y biestables, no en variables ni funciones;
- evitar bucles combinacionales y relojes condicionados;
- saber qué parte del circuito es combinacional y cuál secuencial.

A lo largo del libro se ha pretendido inculcar estas reglas básicas y en el apéndice se vuelve a insistir en ello.

Por último, se presentan varias formas de modelar entornos de test, donde se pueden utilizar las estructuras no sintetizables de VHDL.

5. CONCLUSIONES

Son muy escasos los libros de problemas con esta orientación en la bibliografía actual, ya que la mayoría plantean problemas de sistemas lógicos, en los que los componentes son genéricos y están desprovistos de todo detalle tecnológico. Esto redundaría en una carencia de saber llevar a cabo un problema de diseño digital hasta la fase final, que se hace más patente en estudios eminentemente técnicos, donde el estudiante realiza numerosas asignaturas de laboratorio, no teniendo en la mayoría de los casos un libro de texto donde se resuelvan aplicaciones o problemas de electrónica digital. Este libro es un buen complemento de libros de texto como los de Wakerly [7] y Floyd [10].

REFERENCIAS

- [1] J. I. Artigas, L. Á. Barragán, C. Orrite e I. Urriza, *Electrónica digital. Aplicaciones y problemas con VHDL*, Prentice-Hall, Madrid, 2002.
- [2] J. I. Artigas, L. Á. Barragán y C. Orrite, *Aplicaciones y problemas de electrónica digital*, Pressas Universitarias de Zaragoza, Zaragoza, 1999.
- [3] J. I. Artigas, L. Á. Barragán y C. Orrite, “Libro Aplicaciones y problemas de electrónica digital”, *Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica (TAEE'2000)*, Barcelona, pp. 241-244, 2000.
- [4] K. Skahill, *VHDL for Programmable Logic*, Addison-Wesley, 1996.
- [5] S. Sjöholm, L. Lindh, *VHDL for Designers*, Prentice Hall, London, 1997.
- [6] F. Pardo, J. A. Boluda, *VHDL: Lenguaje para síntesis y modelado de circuitos*, RA-MA, Madrid, 2004.
- [7] J. F. Wakerly, *Diseño digital: principios y prácticas*, Prentice-Hall, México, 2001.
- [8] J. I. Artigas, A. Sanz y L. Á. Barragán, “Tarjeta de control de motor paso a paso para practicas de PLD”, *Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica (TAEE'98)*, Madrid, pp. 61-66, 1998.
- [9] C. Orrite, L. A. Barragán y J. I. Artigas, “Tarjeta de voltímetro digital para practicas con PLD”, *Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica (TAEE'2000)*, Barcelona, pp. 335-338, 2000.
- [10] T. L. Floyd, *Fundamentos de Sistemas Digitales*, Prentice-Hall, Madrid, 2000.