

PRESENTACIÓN DE LA TERCERA EDICIÓN DEL TEXTO DE “ELECTRÓNICA DIGITAL” PUBLICADO POR PRENSAS UNIVERSITARIAS DE ZARAGOZA

T. POLLÁN SANTAMARÍA

*Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza.
Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones. Universidad de Zaragoza.
tpollan@unizar.es*

En el congreso TAAE'2004, la segunda edición del texto de “Electrónica Digital” publicado por Prensas Universitarias de Zaragoza fue acreditada con el premio de la sección de Demostradores (productos docentes acabados). Se acaba de publicar una tercera edición, más completa en cuanto a ejemplos de aplicación y desarrollo de temas de microelectrónica y de diseño avanzado, y hemos considerado conveniente dar a conocer a los profesores participantes en TAAE'2008 la disponibilidad de este nuevo texto y sus características.

1. Introducción

En octubre de 1994 fue publicada por Prensas Universitarias de Zaragoza la primera edición de esta ELECTRÓNICA DIGITAL que, desde el año 1982 y en sucesivas versiones, había sido impresa en forma de apuntes por capítulos. En el curso 2003/2004 se publicó la segunda edición, un nuevo texto en tres volúmenes, actualizado en cuanto a contenidos (tal como requiere el acelerado y constante ritmo de evolución de esta materia y, en particular, de sus componentes electrónicos) y ampliado con numerosos ejemplos de aplicación y con pequeños diseños.

La presente edición pretende mejorar, en lo posible, la organización y el tratamiento de los temas (en particular en cuanto a ejemplos prácticos que ayuden a su comprensión conceptual y metodológica) y actualizar aquellos que se refieren a la microelectrónica y al diseño con un lenguaje de descripción circuital (en concreto con VHDL).

Tras 20 años de elaboración y depuración del texto, de contraste del mismo con su utilización en clase, con las opiniones y dudas planteadas por los estudiantes en tutorías y con la revisión detallada de todos los libros relativos a electrónica digital de los que he tenido referencia, considero que ha alcanzado notable madurez, completitud y utilidad.

Una importante diferencia con la mayor parte de textos similares, es el desarrollo conjunto, y con similar profundidad, de los sistemas lógicos y su realización electrónica; dualidad enfocada a un diseño realista y actualizado de sistemas digitales. Se pretende ir más allá de “sistemas que funcionan sobre el papel”, teniendo como meta la configuración de circuitos electrónicos efectivamente funcionales. Todo ello en una perspectiva moderna, profesional, teniendo presente que ya no se utilizan circuitos integrados estándar, sino que el diseño propio se inserta en un solo integrado programable o se fabrica en un ASIC.

Por motivo de número de páginas, esta nueva edición se ofrece en cuatro tomos: *sistemas combinacionales; sistemas secuenciales; microelectrónica y tecnología CMOS*. No es que esta división sea realmente operativa en cuanto al diseño digital: todo sistema digital de cierta complejidad es secuencial y su realización microelectrónica, normalmente en tecnología CMOS, es la forma de construirlo conforme a la situación actual de la técnica electrónica. Pero de alguna forma había que dividir la materia y la división adoptada es útil en relación con la progresión en el estudio de la misma

2. Planteamiento conceptual

Este texto pretende ser un libro para el estudio tanto de la Electrónica Digital como de los Sistemas Lógicos, que se pone a disposición de los estudiantes de tales asignaturas y de todas las personas interesadas en ellas.

No es un libro de consulta, aunque puede ser utilizado como tal, en particular, en lo referente a temas de metodología de diseño y a ejemplos de aplicación práctica. También puede ser aprovechado, en el mismo sentido, como una guía para la preparación de clases por parte del profesor, aunque no es ese el objetivo específico del texto.

Ha sido elaborado y contrastado con la intención de configurar un libro para el estudio personal, para el esfuerzo individual que cada estudiante ha de realizar para «aprehender», es decir, para «hacer suyos» los conocimientos y la forma de razonar propios de una materia o disciplina.

[*aprender* → *apprehendere* → *apropiarse* → *adueñarse* → *ser dueño de*]

[*comprender* → *comprehendere* → *abarcarse* → *tener dentro* → *hacer suyo*]

Desde tal perspectiva se han ordenado los diversos conceptos y se ha desarrollado la exposición de los mismos, intercalando en dicha exposición numerosos ejemplos que permitan introducir, aclarar o aplicar los correspondientes conceptos. De ahí, también, la reiteración, casi repetitiva, de algunos conceptos e ideas en diversos lugares del texto, con el fin de insistir en su comprensión y asimilación; el detalle con que se analizan los ejemplos que sirven de introducción a algunos temas; la propia presentación del texto, destacando con **negrita** expresiones, variables y valores booleanos...

Un punto de referencia básico lo constituye el concepto de *información* y de su manejo, la consideración finalista de los sistemas lógicos como herramienta conceptual para el procesamiento de la información y de la electrónica como la técnica más eficaz de que disponemos para el tratamiento de la información. Se ha intentado transmitir al conjunto del texto tal referencia básica a la información y a su procesamiento, como objeto y objetivo propio de la electrónica digital.

En tal sentido importa destacar que «todo esto» (es decir, el procesamiento de la información, codificada en símbolos binarios, a que se dedica este libro) comenzó con los trabajos de Georges Boole (*An investigation of the laws of thought*, 1854) y de Claude E. Shannon (*A symbolic analysis of relay and switching circuits*, 1938). En su búsqueda, junto a muchos otros investigadores de su época, de un modelo para expresar matemáticamente el pensamiento humano, esto es, la forma en que el hombre razona, Georges Boole nos legó un «lenguaje formal» (la lógica proposicional) que permite combinar proposiciones y una estructura matemática (el álgebra de Boole) que soporta dicho lenguaje. Claude E. Shannon nos mostró que dicha estructura matemática también soporta los cálculos numéricos en sistema binario y, además, puede ser materializada por medio de conmutadores.

De la disponibilidad de un «lenguaje» y de un «sistema de numeración» capaces de ser ejecutados por unos «dispositivos físicos» y de la forma de configurar adecuadamente tales dispositivos para realizar las correspondientes tareas de cálculo, deducción, decisión y control trata este libro.

Tal es el planteamiento o filosofía conceptual que impregna la redacción del texto. Juntamente con el objetivo de capacitar a quien lo utilice para desarrollar el diseño de sistemas digitales tal como se realiza por los profesionales del mismo. No se conforma con describir los bloques o «piezas de diseño» digital sino que desarrolla el diseño de sistemas avanzados con un lenguaje de descripción circuital y estudia, también en detalle, la tecnología CMOS con la que tales sistemas son construidos actualmente.

3. Dicho en forma más personal y directa como autor

Mi objetivo al construir este texto de Electrónica Digital es que sea útil (y, en la medida de lo posible, grato) para estudiar esta materia. He pretendido formar, no simplemente informar; deseo compartir horas del estudiante, no momentos puntuales de consulta.

He querido ofrecer a cada estudiante un recurso para comprender y aprender, en el profundo sentido literal que esas palabras tienen (según su derivación latina) de «hacer suyos» y «llegar a ser dueño de» los conocimientos y procedimientos de una electrónica digital conceptualizada, estructurada y actualizada.

De forma que la asimilación de la estructura conceptual y funcional de la electrónica digital le capacite para aplicarla y para seguir aprendiéndola (en el sentido de «aprehender», capturar) en su labor profesional futura; lo que una compañera de mi escuela califica, con razón, «llevar a la práctica» y «aprender a aprender».

Quizás este texto sea útil, también, en cuanto elemento de reflexión o de referencia, para otros compañeros, profesores de esta materia, como propuesta (meditada y probada) de una posible articulación de la misma y de una forma de introducir y enlazar conceptos y métodos y de presentarlos y desarrollarlos.

Toda materia de estudio necesita una teoría. Y entiéndaseme bien: soy un convencido de que la electrónica es una disciplina práctica, una técnica para «hacer cosas», en concreto, para manejar la información. Pero como objeto de estudio, no puede reducirse a un recetario o catálogo de recursos.

En los años 70 y principios de los 80 me preocupaba mucho la carencia de libros de electrónica conceptuales; libros que no fueran un mero repertorio de los recursos disponibles, que estructurasen tales recursos dentro de un guión global y fundamentado. Exceptuando la colección SEEC (que, siendo sin dudas una referencia valiosa, estaba dedicada más a la física del estado sólido que a la electrónica como tal), los libros de entonces me parecían, en buena medida, una prolongación aplicada y ampliada (y relativamente ordenada) de los catálogos de componentes; los percibía como una película de escenas dispersas, sin guión argumental.

Yo echaba en falta una estructura formalizada, un relato conceptual, para un estudio comprensible de la electrónica. Además, desde mi convicción personal de que la electrónica es una técnica (muy eficiente) de manejo de la información, sentía la necesidad de que esa finalidad (propia y justificativa de la electrónica) quedará plasmada en ese guión, como preludeo y como música de fondo que debería acompañar a todo el texto.

Con ese espíritu, a finales de los años 70, comencé a confeccionar lo que yo deseaba que fuera un relato estructurado, que diese justificación, sentido y futuro a las múltiples y cambiantes piezas de diseño digital. Y, una vez empezados estos apuntes, he procurado ampliarlos, depurarlos, renovarlos y actualizarlos, en contraste directo con la práctica docente (a la que me dedico con auténtica ilusión y satisfacción). Hasta llegar a esta edición de 2007, en cuatro tomos, de los cuales los dos primeros los utilizo (no tal cual, sino en partes y con otro orden, ya que no he querido hacer unos «apuntes de clase») en una asignatura anual de “Electrónica Digital” (de 9 créditos) y los otros dos volúmenes, en otra asignatura optativa de “Microelectrónica” (también anual y de 9 créditos).

Mi propósito al presentar estos libros al TAEE2004 ha sido el de ofrecer los diversos capítulos a los compañeros, profesores de electrónica, de forma que, si a alguno le interesa alguna parte de estos textos la utilice libremente. Soy consciente de que «cada maestrillo nos aferramos a nuestro librito» y no aspiro, ni siquiera, a que uno de mis volúmenes parezca totalmente adecuado para las clases de otro compañero; pero, sí quizás, alguno de sus capítulos: que los aproveche, que es una pena que, muchas veces, repitamos un mismo esfuerzo de elaborar textos y materiales docentes.

Personalmente no tengo ningún interés en los derechos de autor y estoy convencido (mi hijo Rubén tiene buena «culpa» de ello) de que una sociedad con libertad de información resulta mucho más humana y esperanzada. Por ello, no tengo ningún inconveniente en que los capítulos de estos libros se distribuyan libremente (aunque si rogaría, por respeto a la editorial de mi universidad, que se adquiriese el correspondiente volumen, si se va a utilizar una parte importante del mismo).

3. ¿Qué aportan estos libros?

- Un esfuerzo de conceptualizar y formalizar la electrónica digital, en el sentido aludido en el apartado anterior, pero siempre desde una perspectiva práctica e ingenieril.
- Una buena simbiosis entre sistemas lógicos y tecnología electrónica, de forma que no son libros de sólo «ceros y unos» o de sólo «transistores»; tal integración de sistemas y tecnología digitales no es nada común en los libros de electrónica o de sistemas digitales.
- Una perspectiva de la electrónica como técnica de manejo de la información que impregna y se transmite a lo largo de todo el texto.
- Un recorrido completo, un sendero que lleva desde los fundamentos hasta los sistemas complejos, desde lo más básico hasta lo más actual, desde Boole y Shannon hasta los ASICs, las FPGAs y el VHDL.
- Una insistencia reiterativa en los conceptos e ideas importantes, reiteración que, para el entendido puede ser cansina, pero que, sin duda, es necesaria en el proceso de estudio y aprendizaje.
- Centenares de ejemplos de aplicación y diseño, de forma que el desarrollo conceptual va seguido, con inmediatez, de su aplicación a ejemplos concretos; son libros de conceptos, pero, también, de problemas.
- Una aproximación efectiva al diseño de sistemas digitales complejos, desarrollando las pautas que permiten abordar tal diseño e incluyendo numerosos ejemplos de interés.
- El estudio comprensivo de la tecnología con la que tales sistemas digitales van a ser realizados, planteado en forma de modelos básicos que permitan razonar y extraer conclusiones prácticas de las limitaciones o requisitos que dicha tecnología impone sobre el diseño.
- La disponibilidad de tres páginas Web muy completas, una de ellas dedicada al libro (las otras dos de las asignaturas de electrónica digital y microelectrónica), <http://www.unizar.es/euitiz/digital.htm>; en tales páginas pueden encontrarse múltiples materiales de utilidad: textos de los capítulos, comentarios, ejercicios, guiones de prácticas, hojas de características, enlaces...

En las próximas páginas se desarrollan estas aportaciones, concretando, para cada uno de los cuatro volúmenes del texto, las aportaciones y aspectos novedosos de particular interés.

3.1. En el primer volumen (I. Sistemas Combinacionales)

- 160 páginas de sistemas lógicos y 120 de tecnología electrónica, con una opción decidida por las tecnologías CMOS.
- Un capítulo previo de perspectiva general de la electrónica y de la dualidad entre electrónica analógica y electrónica digital.
- Un primer capítulo que justifica toda la electrónica digital en el isomorfismo entre las tres álgebras de booleanas que nos regalaron Boole y Shannon.
- Un acercamiento, meramente introductorio, al VHDL en los capítulos de operaciones booleanas y de bloques combinacionales, expresando en forma textual los circuitos dibujados gráficamente.
- La inclusión, en el mismo capítulo, de los bloques aritméticos junto con la codificación numérica (en la perspectiva de manejo de la información, en este caso, cuantitativa).
- La generalización y justificación de las configuraciones ROM, PLA y PAL, como estructuras reticulares que permiten abordar la síntesis de conjuntos de funciones complejas.
- Una formalización estructurada de las características de las familias lógicas integradas, a partir de los datos de catálogo de los fabricantes
- Un apartado dedicado al ruido en los sistemas digitales, a la importancia de tenerlo en cuenta y a las formas de defenderse de las interferencias electromagnéticas...
- Un apéndice relativo a “semiconductores, unión PN y transistores MOS” que introduce, en forma breve pero operativa, un modelo funcional de los mismos y puede resultar muy útil para estudiantes no habituados a la teoría de semiconductores.
- El mencionado apéndice incluye una exposición de las etapas básicas de la integración en tecnología CMOS, para «desvelar el misterio» de la fabricación de circuitos integrados.

3.2. En el segundo volumen (II. Sistemas Secuenciales)

- Una apuesta decidida por el diseño síncrono, como forma de enfrentarse a un parámetro complejo cual es el tiempo.
- Un capítulo específico sobre significado, utilidad y requisitos del sincronismo que supone una profunda reflexión y una llamada de atención sobre lo que el sincronismo es, lo que aporta y lo que exige.
- Una perspectiva ingenieril y significativa en la reducción de tamaño de los grafos de estado, más allá de tablas y matrices (que siempre me han resultado de poca utilidad en los casos reales).
- Una metodología propia y particular de diseño de contadores, que permite abordar con sencillez el diseño de contadores grandes.
- Un extenso capítulo de aplicaciones de los contadores, en la consideración de que son uno de los bloques más útiles para el diseño de sistemas de control y de medida.
- Un apéndice sobre diseño de monostables y astables, como circuitos auxiliares en el diseño digital.
- Dos capítulos dedicados a buses y mapas de memoria, como recurso genérico de diseño digital, no solamente como parte de sistemas que actúan bajo programa.
- Un último capítulo de convertidores D/A y A/D como interfase necesaria entre el mundo analógico y el sistema digital, insistiendo en la gran diferencia entre la precisión que aporta el 0 y 1 digitales y las posibilidades de error que aparecen en los convertidores.

3.3. En el tercer volumen (III. Microelectrónica)

- El concepto de microelectrónica como inserción de todo el sistema digital diseñado por el «usuario» en el interior de un único circuito integrado y la prevalencia del diseño con librería (que luego se concreta en diseño con lenguaje de descripción circuital) como forma habitual de diseño.
- La presentación conjunta de los dispositivos programables y de los ASIC fabricados como circuitos integrados especificados por el usuario y de sus herramientas de diseño.
- Una presentación justificada y muy detallada de la configuración FPGA, como estructura genérica (y no como producto de fabricante) y, dentro de ella, la realización de operaciones aritméticas.
- Tres capítulos de VHDL (100 páginas), contruidos sobre ejemplos de diseño digital como forma operativa de aprender con rapidez un lenguaje HDL, el último de ellos con múltiples e interesantes diseños de sistemas de control, como forma de aprender a diseñar, «diseñando».
- La inclusión en los citados capítulos de VHDL de la descripción de vectores y formas de onda para la simulación funcional de sistemas digitales y del detalle de la realización de tal simulación.
- Un capítulo dedicado al efecto del tiempo sobre los sistemas digitales, tanto combinacionales como secuenciales, y a la forma de responder a esa «afectación».
- 70 páginas dedicadas a aproximación al diseño de sistemas complejos (respondiendo al reto formulado en las Jornadas de Tecnología Electrónica de 1994, en Santander, de que «nos quedábamos en las piezas y bloques y no enseñábamos un autentico diseño de sistemas digitales»), que pretenden transferir, en forma estructurada, las pautas y formas de actuar que los profesionales aplicamos al abordar tal diseño.
- Un capítulo dedicado específicamente a la modulación de anchura de pulsos (como «alternativa digital a procesos básicamente analógicos»), integrando en el mismo tanto al típico controlador *on/off* como al modulador por sumas repetitiva y a los convertidores por rampa y sigma delta y utilizando para sus aplicaciones un sencillo análisis por compensación de carga

3.4. En el cuarto volumen (IV. Tecnología CMOS)

- Cuatro capítulos de «microelectrónica física», entrando en el interior de los circuitos microelectrónicos, pero no como física del estado sólido, sino como modelización, útil para el diseño en cuanto a modelos operativos de los que se desprenden posibilidades, limitaciones, orientaciones y advertencias.
- El aprovechamiento en estos cuatro capítulos citados de los diagramas de Memelink para modelizar gráficamente el comportamiento de los transistores y obtener, con facilidad, resultados numéricos.
- La presentación y utilización del simulador SPICE, incluyendo en el texto los resultados de esta simulación.
- Dos capítulos dedicados a la fabricación en tecnología CMOS, en el segundo de los cuales se detallan y justifican valores numéricos de las características físicas de las diversas regiones CMOS.
- Otros dos capítulos específicos y muy detallados sobre test de fabricación de los circuitos integrados.
- Un último capítulo dedicado al ruido en los sistemas digitales, a las causas físicas que lo producen y a las formas de defenderse de las interferencias electromagnéticas.

3.5. ¿Qué falta?

- Todo lo referente a procesadores, microprocesadores, en cuanto a sistemas que actúan bajo programa (respecto a los cuales existe un texto en la misma colección de Prensas Universitarias de Zaragoza).
- El diseño y, sobre todo, la simulación con Verilog, como lenguaje muy apropiado para tal finalidad.

4. Panorama general del texto de electrónica digital

Se detalla y justifica a continuación el contenido de los sucesivos capítulos y apéndices de los cuatro volúmenes del texto.

4.1. Sistemas combinacionales

La base matemática de la electrónica digital la constituye el álgebra de Boole, cuyas funciones expresan todas las correspondencias entre las variables de los sistemas digitales. Por ello, resulta adecuado comenzar por el estudio del álgebra booleana, sus operaciones y teoremas (cap. 1) y la forma de construir y simplificar las funciones booleanas (cap. 2).

Todo ello con referencia a las tres álgebras de Boole de dos elementos cuyo isomorfismo es la base de la electrónica digital (cap. 1): la lógica proposicional (lenguaje formal para razonar), el sistema binario (sistema de numeración para calcular) y el álgebra de conmutadores (componentes físicos para construir las operaciones booleanas). La diversidad de representaciones de una función booleana (cap. 2) es la base para su construcción circuital, siendo sumamente útiles los procedimientos de simplificación de la función para reducir el tamaño del circuito.

Las funciones booleanas pueden agruparse en bloques o módulos que realizan operaciones globales de interés genérico: bloques combinacionales. De un lado (cap. 3), interesan los bloques que efectúan operaciones aritméticas entre dos números binarios y, dentro de esta perspectiva numérica, interesa ampliar el código binario para representar (con los únicos dos símbolos disponibles, el **0** y el **1**) números negativos y números con parte decimal.

Por otra parte (cap. 4), son útiles los bloques que facilitan la distribución de la información y la selección de posibilidades (multiplexores, demultiplexores y decodificadores) y, también, los que simplemente trasladan la misma información de un código a otro (codificadores). Estos tipos de bloques (distribuidores y codificadores) pueden construirse mediante configuraciones reticulares de sus conexiones, lo cual simplifica en gran medida su diseño y fabricación.

Los bloques combinacionales conforman «piezas de diseño» que facilitan la división de un sistema digital en partes y permiten configurarlo por ensamblaje de tales módulos.

Se trata siempre de construir conjuntos de funciones booleanas, lo cual se complica cuando el número de sus entradas es alto: las estructuras matriciales (cap. 5) permiten abordar tal complejidad. Existen tres estructuras conceptualmente simples ROM, PAL y PLA, que facilitan la descripción y construcción de bloques combinacionales de muchas entradas; tales configuraciones sirven, además, para conformar circuitos integrados programables, disponibles para insertar (programar) en su interior el conjunto de funciones booleanas de un codificador concreto o de un bloque combinacional específico, propio de un diseño particular.

Una vez recorridos «los cimientos y el almacén de piezas» de los sistemas lógicos combinacionales (las funciones y los módulos que hacen viable su diseño), conviene recordar que la materia sobre la que trabajan es la información y que ésta se encuentra codificada en palabras binarias de «ceros» y «unos», existiendo múltiples posibilidades de codificación (cap. 6). Conviene, asimismo, tomar conciencia de la posibilidad de error (principalmente en la transmisión y en la conservación de la información) y conocer la existencia de códigos capaces de detectar e, incluso, de corregir los errores.

Hasta aquí (capítulos del 1 al 6) se ha tratado de los sistemas lógicos sin referencia a la electrónica que permite construirlos físicamente; también es preciso conocer y comprender la tecnología (y a ello van dedicados los capítulos 7, 8, 9 y 10).

Las puertas con diodos (cap. 7), además de su utilidad como puertas individuales, sirven para apreciar la necesidad de buen acople en tensión (requisito inexcusable para conectar una puerta lógica a la siguiente, ya que lo que se transmite es una tensión eléctrica). Por otra parte, las puertas lógicas habituales son de tipo inversor, construidas con interruptores según el álgebra de conmutadores, y el transistor NMOS es un excelente interruptor.

La combinación de interruptores de los dos tipos complementarios, utilizando transistores NMOS y PMOS, permite anular el consumo estático de las puertas lógicas y reducir su resistencia de salida, configurando puertas de características cuasi-ideales; es por ello la tecnología digital predominante: familia lógica CMOS (cap. 8).

La tecnología CMOS ofrece una muy amplia diversidad de configuraciones (cap. 9), tanto en variedad de puertas complementarias como en otros tipos de puertas para aplicaciones específicas: las puertas de transmisión facilitan la configuración de multiplexores y la desconexión (estado de alta impedancia) y las puertas pseudoNMOS permiten construir estructuras matriciales de muchas entradas y, también, los bloques programables tipo ROM, PAL y PLA.

Como puede apreciarse este texto opta por los transistores MOS y, en concreto, por la tecnología CMOS como forma de realización física de los circuitos digitales; ello se fundamenta en dos razones:

- los transistores MOS se corresponden, casi idealmente, con los interruptores propios del álgebra de conmutadores, que es la base conceptual para construir físicamente los sistemas digitales;
- la integración CMOS es, actualmente, la forma habitual de realización de circuitos integrados digitales. A partir de los años ochenta, la CMOS relegó a un segundo plano a las tecnologías bipolares y, por sus excelentes características funcionales, se ha impuesto como la tecnología propia de la electrónica digital (siendo previsible que su actual predominio se mantenga, al menos, en las próximas dos décadas).

Cerrando la parte referida a la realización electrónica de los sistemas lógicos, se presenta (cap. 10) la evolución histórica y el panorama general de las familias lógicas integradas, junto con las características a tener en cuenta a la hora de utilizarlas y el problema de las interferencias electromagnéticas que afectan a los circuitos digitales.

El primer volumen incluye dos apéndices. Uno de ellos (A1) dedicado a la simplificación de funciones booleanas según el algoritmo de Quine-McCluskey. En el segundo (A2) se explica, en forma conceptual, breve y sencilla pero con adecuada profundidad, el comportamiento de los semiconductores y de la unión PN y se desarrolla un modelo operativo de funcionamiento de los transistores MOS; se incluye, asimismo, una breve descripción del proceso de fabricación de circuitos integrados CMOS.

4.2. Sistemas secuenciales

Los sistemas secuenciales son sistemas digitales que incorporan memoria de su pasado; ésta se consigue mediante realimentación en las propias funciones booleanas.

La memoria presenta dos aspectos (cap. 11): la necesidad de recordar la evolución anterior del sistema y el almacenamiento de datos para su posterior utilización; en ambos casos, el biestable es la célula básica capaz de almacenar un dígito. El conjunto de variables de estado contiene la información que el sistema secuencial necesita sobre su pasado y los grafos de estado son una herramienta adecuada para representar el comportamiento del sistema (evolución del estado).

El proceso de diseño secuencial (cap. 12), a partir del grafo de estados y de la asignación de una palabra binaria a cada uno de ellos (codificación), consiste en dedicar un biestable a cada variable de estado y establecer las funciones que controlan dichos biestables (evolución del estado) y las variables de salida (activación de las salidas).

El sincronismo, como división del tiempo en unidades discretas, facilita el diseño de los sistemas secuenciales y les confiere una gran seguridad de funcionamiento. Se requiere una señal de reloj, cuyos flancos señalarán el paso de una unidad de tiempo a la siguiente, y biestables síncronos que solamente cambien en dichos flancos (cap. 13); la combinación de biestables con funciones previas en configuración PAL da lugar a circuitos integrados programables, capaces de admitir la inserción (por programación) en su interior de un sistema secuencial completo.

El diseño de sistemas secuenciales con biestables síncronos (cap. 14) pasa también por establecer las funciones de evolución (que actúan sobre los biestables que contienen las variables de estado) y las funciones de activación de las salidas. El diseño síncrono es intrínsecamente necesario en sistemas de procesamiento o transmisión serie (en los cuales a cada dígito le corresponde un intervalo de tiempo definido por el reloj) y es altamente conveniente en todo tipo de diseño digital de una cierta complejidad.

El sincronismo ofrece facilidad de diseño al referirlo a unidades de tiempo discretas y numeradas pero, sobre todo, seguridad de funcionamiento para evitar las aleas y errores debidos a los diferentes tiempos de propagación. Para ello es preciso comprender en profundidad su significado conceptual y los requisitos que el sincronismo impone (cap. 15); tales requisitos se reflejan sobre los biestables, en forma de condiciones de diseño y tiempos funcionales que han de ser respetados, y sobre la señal de reloj, cuya verticalidad, simultaneidad y no-contaminación han de ser aseguradas.

Los contadores (cap. 16) son un tipo especial de registros que evolucionan entre números consecutivos (pasan de un número al siguiente o viceversa) y sirven para contar pulsos y para dividir frecuencias. En concordancia con la orientación general de este texto, su tratamiento es síncrono, tanto en su configuración como en su conexión y utilización.

Los contadores son sumamente útiles en el diseño de sistemas de medida y de control, por la gran variedad de sus aplicaciones (cap. 17): contaje y control de número de objetos o sucesos, medida de tiempos (los contadores son la herramienta específica para manejar el tiempo), medida de frecuencias y de número de revoluciones... Asimismo, los pulsos de anchura modulada (controlada mediante contadores) permiten realizar, de forma sencilla, controles de potencia (*on/off*, todo/nada) o de amplitud de señales (potenciómetros digitales), referencias de tensión...

Algunos sistemas digitales necesitan almacenar en su memoria grandes cantidades de datos, para ello los registros se agrupan en amplios bloques, denominados memorias (cap. 18); tales bloques (RAM) presentan aspectos novedosos relativos a la organización de la transferencia de la información por medio de buses (de datos, de direcciones y de control). El bus de direcciones genera un amplio campo de posiciones numeradas para situar los registros de los bloques de memoria: mapa de memoria.

La arquitectura basada en la utilización de buses permite agrupar múltiples bloques de memoria (algunos de ellos de sólo lectura ROM) y, también, incorporar dentro de la memoria los periféricos de entrada y de salida (cap. 19); para ello, es preciso situar circuitalmente cada bloque en un segmento del mapa de memoria y dotar de adecuada fuerza a las señales que son transmitidas por los buses.

No es posible obviar la relación entre los sistemas digitales y el mundo exterior, básicamente analógico (cap. 20), los circuitos que facilitan la comunicación de los sistemas digitales con su entorno físico analógico: conversores de información digital a analógica y viceversa, de tensiones analógicas a códigos digitales.

Un primer apéndice (A3) se dedica a circuitos auxiliares, complementarios de los digitales, para la gestión del tiempo; circuitos temporizadores que permiten la determinación de intervalos de duración dada: osciladores para producir ondas de reloj y monostables para pulsos de anchura dada. El segundo apéndice trata del diseño de contadores síncronos: aunque son circuitos secuenciales, su diseño, cuando son grandes, requiere una metodología propia debido al gran número de estados que presentan (si bien muy ordenados entre sí). Otro pequeño apéndice (A5) introduce los bloques de memoria dinámica, que ofrecen amplias capacidades de memoria pero necesitan refrescar continuamente la información almacenada en ellos.

4.3. Microelectrónica

El diseño digital actual se desarrolla en forma «micro»: la microelectrónica digital alude a la configuración del circuito electrónico completo, resultante de un diseño específico, en el interior de un solo integrado. Lo cual supone pasar de la interconexión de circuitos integrados estándar a la construcción de un circuito integrado específico.

Se trata de insertar nuestro propio diseño completo en un único circuito integrado, que no será de tipo estándar, disponible en catálogo, sino de «aplicación específica»: circuitos integrados especificados por el usuario; disponemos de dos alternativas:

- programar nuestro diseño sobre un circuito integrado programable
- o, fabricar dicho diseño como circuito integrado específico, ASIC.

Para ello, se ha de conocer cómo llevar a cabo el proceso de diseño de un sistema digital para conseguir configurarlo en el interior de un circuito integrado: insertarlo sobre un dispositivo programable o fabricarlo como integrado específico. Las dos opciones (programación o fabricación del diseño) utilizan el mismo esquema de desarrollo del proceso de diseño, el mismo tipo de herramientas y las mismas consideraciones metodológicas a tener en cuenta.

Es razonable comenzar estudiando (cap. 21) las diversas posibilidades de programación y fabricación que permiten obtener un circuito integrado con un diseño específico completo, así como las herramientas que se utilizan para tal diseño; y considerar luego, en detalle (cap. 22), la configuración y prestaciones de los circuitos integrados programables de tipo avanzado (FPGAs).

El diseño microelectrónico se desarrolla habitualmente con la ayuda de un lenguaje de descripción circuital, siendo uno de los más utilizados el VHDL (caps. 23, 24 y 25). VHDL es un lenguaje de descripción y simulación de sistemas en general y, desde el punto de vista de la microelectrónica, interesa la parte que puede ser sintetizada por compiladores digitales, es decir, que puede ser traducida a un conjunto de puertas y biestables para configurar un circuito digital.

La potencia de un lenguaje se despliega en las posibilidades de descripción modular (cap. 24) que permiten la reutilización de módulos (funciones, procedimientos, componentes...); además, debe servir para describir los vectores o formas de onda con los que realizar la simulación.

El aprendizaje de un lenguaje de «programación» se adquiere utilizando dicho lenguaje («programando»). "A diseñar se aprende diseñando"; a describir circuitos en un lenguaje se aprende mediante el ejercicio de descripción de circuitos concretos y variados (cap. 25).

El tiempo (cap. 26) es una variable compleja que, aunque no se encuentra explícitamente indicada en las expresiones algebraicas o en el dibujo circuital, afecta a las variables booleanas y, más aún, en el caso de variables que poseen memoria: circuitos secuenciales. En los sistemas combinacionales, el tiempo causa simplemente retrasos que han de tenerse en cuenta para obtener el vector de salida correcto; en los secuenciales, el tiempo puede provocar errores no transitorios sino permanentes: el sincronismo evita tales errores funcionales, coordina la actuación de los diversos módulos y facilita en gran medida el diseño.

La microelectrónica permite abordar sistemas digitales muy complejos y resulta adecuado considerar las pautas o «formas de actuar» que orienten y faciliten el diseño complejo. Frente a lo grande y complicado la estrategia más eficaz de los limitados cerebros humanos es la división en partes, una división que no ha de perder la visión de globalidad: fraccionar con estructura.

Existen esquemas habituales de división de los diseños en partes que facilitan en gran medida el diseño de sistemas complejos (cap. 27): la arquitectura de buses como separación de procesador y memoria, la distinción entre parte operativa y de control en los procesadores, la segmentación (*pipeline*) para aumentar la velocidad...

La división entre la parte que efectúa operaciones y la parte que ejerce su control facilita, en gran medida, el desarrollo de procesadores (calculadores o controladores) digitales. La parte de control puede expresarse en un algoritmo y configurarse mediante un grafo de estados que recibe la denominación de máquina algorítmica (cap. 28). Con esta técnica, aplicada a través de un lenguaje de descripción circuital, no resulta difícil realizar operaciones complicadas (como la raíz cuadrada de un número binario o la conversión entre binario y BCD) o abordar el diseño de sistemas de control complejos.

La modulación de anchura de pulsos, merece particular atención (cap. 29); la información reflejada sobre amplitudes de tensión no resulta apropiada para los métodos digitales y, en cambio, hay procedimientos digitales que facilitan un buen manejo de tal información expresada en anchura de pulsos de amplitud fija. Los pulsos de anchura modulada permiten realizar con procedimientos básicamente digitales tareas que, en principio, parecen más propias de la electrónica analógica como el control de potencia, la conversión digital-analógica y la recíproca de analógica a digital, la disponibilidad de potenciómetros para controlar la amplitud de las señales...

4.4. Tecnología CMOS

Es necesario conocer el soporte material que permite la programación o fabricación de un circuito específico, estudiar con un poco de detalle la tecnología que permite «materializar» un diseño particular. En tal sentido, un modelo básico conceptual y operativo de la tecnología que se utiliza facilitará la comprensión de sus posibilidades, sus prestaciones, sus limitaciones y sus exigencias (los requisitos que la tecnología impone sobre el diseño).

Se trata, en primer lugar (cap. 30), de disponer de un modelo funcional del comportamiento de los transistores MOS: los diagramas de Memelink son una buena herramienta para la representación gráfica de la distribución de carga en el canal de los transistores y para efectuar cálculos de tensiones, intensidades, tiempos y consumos.

A partir del modelo de los transistores utilizados, pueden estudiarse en detalle las características del inversor CMOS (cap. 31), como prototipo de las puertas inversoras; y las de las puertas pseudoNMOS y las puertas de transmisión (cap. 32), como alternativas de interés para determinadas configuraciones. Asimismo, la lógica dinámica ofrece una reducción de tamaño que puede aprovecharse para aumentar la densidad de integración. Diversas cuestiones completan el panorama de un circuito integrado global (cap. 33): entradas y salidas, densidad de integración, etapas analógicas complementarias dentro del mismo integrado digital (ASICs mixtos)...

Interesa, también, conocer con un cierto detalle el proceso de fabricación de los circuitos integrados CMOS (cap. 34): las etapas básicas de tal proceso, las operaciones físico-químicas que se aplican y el detalle de los sucesivos pasos que conforman el proceso de integración.

Resulta de interés tener una referencia sobre los valores numéricos de los parámetros físicos de las regiones que forman parte de un circuito integrado CMOS: concentraciones de impurezas y de portadores, movilidad de los mismos, resistividad, capacidad...; ello permite tener una idea precisa de la configuración atómica y de las propiedades eléctricas de cada zona semiconductor, conductora o aislante (cap. 35).

Tras la fabricación de circuitos integrados CMOS se plantea el problema del test (cap. 36); los vectores o métodos de comprobación de que un circuito integrado se ha fabricado bien son responsabilidad del diseñador, aunque su aplicación efectiva corresponda al fabricante.

Los circuitos secuenciales requieren configuraciones específicamente preparadas para el test (*scan path*) y ese mismo tipo de recursos ha servido para desarrollar el test de placas o de sistemas digitales completos (cap. 37). Asimismo, los recursos circuitales internos pueden ayudar eficazmente a la realización del test e incluso realizarlo autónomo sin necesidad de un costoso equipamiento externo.

Uno de los aspectos tecnológicos que requiere particular atención en el diseño, puesta a punto y utilización de sistemas digitales es el problema del ruido (cap. 38). El último capítulo de este texto se dedica a las interferencias electromagnéticas, detallando sus causas físicas, los mecanismos que las producen y transmiten en relación con los circuitos digitales y las formas de evitar o reducir sus efectos.

Un último apéndice (A6) describe el simulador SPICE como eficaz herramienta de simulación eléctrica del comportamiento y características de transistores, circuitos, puertas y bloques digitales.