

ELECTRÓNICA DIGITAL. UN LIBRO PARA SU ESTUDIO

Tomás Pollán Santamaría
Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Universidad de Zaragoza. tpollan@unizar.es

RESUMEN

Prensas Universitarias de Zaragoza ha publicado un texto de «electrónica digital», distribuido (por razones de tamaño, precio y utilización) en tres partes: Sistemas combinacionales, Sistemas secuenciales y Microelectrónica digital. Pretende ser un libro para el estudio, 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 esta disciplina. El resultado ha sido un manual muy «completo» y puesto al día, que procura recorrer todo el camino que lleva desde los conceptos y métodos básicos hasta los sistemas complejos, situándose en una perspectiva de diseño digital actual (en que los circuitos se realizan, en tamaño «micro», sobre dispositivos programables o ASICs). Particular interés tienen capítulos no habituales, como los referentes al problema del ruido, al significado y requisitos del sincronismo, a la modulación en anchura de pulsos, a VHDL, al test de fabricación,...

1. PRESENTACIÓN

En octubre de 1994 fue publicada por Prensas Universitarias de Zaragoza, en la Colección de Textos Docentes, 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. Habiéndose agotado la primera edición, abordé la tarea de escribir un nuevo texto con la finalidad de actualizar sus contenidos (tal como requiere el acelerado y constante ritmo de evolución de esta materia y, en particular, de sus componentes electrónicos) y de mejorar en lo posible la organización y el tratamiento de los mismos.

La presente edición, por motivo de número de páginas (y, también, por razones de precio y de secuencia de utilización), se ofrece en tres tomos: el primero con el subtítulo de *sistemas combinacionales*, con el de *sistemas secuenciales* el segundo y el último relativo a la *microelectrónica digital*. No es que esta división sea realmente operativa en cuanto al diseño digital; de hecho todo sistema digital de una cierta complejidad es secuencial y todo diseño digital actual es microelectrónico. 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.

Este texto pretende ser un libro para el estudio tanto de la Electrónica Digital como de los Sistemas Lógicos (en el caso de los dos primeros volúmenes, el tercero es más específico de *microelectrónica*), que se pone a disposición de los estudiantes de tales asignaturas y de todas las personas interesadas en ellas. Para facilitar su utilización por parte de quienes se encuentren interesados en los sistemas lógicos, pero no en su realización electrónica, se ha procurado separar en capítulos distintos dichos aspectos.

No es un libro de consulta; existe un gran número y una amplia diversidad de libros de consulta disponibles, algunos de los cuales vienen reseñados en la bibliografía, al final del texto. Ni tampoco pretende ser una guía para la preparación de las clases por parte del profesor, aunque seguramente pueda proporcionar una ayuda eficaz en tal sentido.

El 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* → *aprehendere* → *apropiarse* → *adueñarse* → *ser dueño de*]

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,...

La primera página de cada capítulo, además del índice, contiene un breve resumen y justificación de su contenido, a modo de invitación a su estudio y, también, para establecer la perspectiva y finalidad del capítulo en el contexto global de los sistemas digitales.

En las secciones 5, 6 y 7 de esta comunicación se describe, con un cierto detalle, el contenido de cada uno de los volúmenes. Además, aprovechando la disponibilidad de espacio, en la sección 2 se afirma, a modo de declaración de principios, la información como concepto referencial de todo el texto: la electrónica como técnica de manejo de la información; y, en el mismo sentido, las secciones 3 y 4 inciden en dicho «manejo de la información» en su perspectiva histórica y en su perspectiva simbólica.

Material complementario para el estudio y utilización de este texto se encontrará en la página www.unizar.es/euitiz/digital.htm: en ella se dispondrá de copia actualizada de los capítulos; ampliaciones, comentarios, observaciones y erratas; hojas de ejercicios clasificadas por temas; colecciones de transparencias; etc., que pueden ser utilizadas, copiadas y distribuidas libremente en los términos de la licencia de Documentación Libre GNU (referencia <http://gugs.sindominio.net/licencias/fdl-es.html>).

La página WEB de Prensas Universitarias de Zaragoza (editorial propia de la Universidad de Zaragoza) es: <http://puz.unizar.es/index.html>.

2. LA INFORMACIÓN COMO PIEDRA ANGULAR

Un punto de referencia básico en la redacción del texto 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 técnica eficaz para el tratamiento de la información. Ha sido escrito con el deseo expreso de transmitir al conjunto del texto tal referencia básica a la información y a su procesamiento, como objeto y objetivo propio de la electrónica digital.

La electrónica es la técnica de manejo de la información más eficaz que, hoy por hoy, posee el hombre; la electrónica maneja la información codificada en señales eléctricas y utiliza, para ello, dispositivos que aprovechan las propiedades de los electrones.

Desde la perspectiva del desarrollo histórico de la electrónica, podemos identificar tres grandes áreas de aplicación en el manejo de la información:

➤ Telecomunicación: enviar la información lejos, tanto en el espacio (comunicación por ondas) como en el tiempo (almacenamiento de la información en un soporte material para reproducirla posteriormente).

- Automatización: utilizar la información para controlar procesos; para ello, aparte de las propias operaciones a efectuar sobre la información, se necesitan sensores (capaces de convertir en señales eléctricas las magnitudes físicas que afectan al proceso) y efectores (capaces de traducir las señales en acciones, en definitiva en otro tipo de magnitudes físicas).
- Informatización: procesar la información en sí misma para darle una nueva forma o para obtener nueva información a través de combinar varias informaciones.

Estos tres ámbitos de actuación sobre la información coinciden con las tareas que la electrónica ha ido abordando, sucesivamente, en su desarrollo a lo largo del siglo XX. También coinciden con las tres especialidades de la ingeniería dedicadas a la electrónica: telecomunicaciones, electrónica industrial (control de procesos) e informática.

¿Por qué la información? ¿Qué interés tiene para nosotros la información?

La información es una componente de la actividad humana; es, probablemente, la componente más intrínseca de la actividad del hombre. Junto con los materiales y la energía, la información está presente, como parte integrante y necesaria, en las diversas acciones de los humanos (incluso podemos distinguir actuaciones en las que no intervengan, externamente, los otros dos componentes, materia y energía, como es la simple reflexión o pensamiento).

Pero, además, materiales, energía e información representan escalones sucesivos en la macrohistoria socio-económica del hombre. Durante el proceso histórico del devenir humano, el hombre tuvo que ocuparse, en un primer y muy prolongado período, de los materiales que satisficieran sus necesidades, que le permitieran sobrevivir y vivir cada vez mejor, que le aportaran comodidades y, también, que le sirvieran para confeccionar útiles e instrumentos que facilitasen y aumentasen la eficacia de sus acciones.

En segundo lugar, el hombre se preocupó de que «otros» trabajasen por él, de desarrollar formas de complementar y de suplir su trabajo y su esfuerzo, hasta poder aprovechar las más diversas fuentes de energía y disponer de mecanismos que permitieran utilizar la energía externa para obtener los productos y servicios que le interesaban. Un hito relevante de este proceso de aprovechamiento de la energía lo constituye la máquina de vapor, que da lugar a un período histórico conocido como revolución industrial («mudanza en el estado de las cosas» producida por la utilización eficaz de la energía en los procesos de producción).

Hoy día, el hombre se encuentra con la posibilidad de utilizar recursos externos para manejar la información, para transmitirla, recogerla y ampliarla y, también, para utilizar, en lugar del propio hombre, la información. Lo que hasta hace poco parecía patrimonio específico del hombre, la captación, el procesamiento y la utilización eficaz de informaciones complejas en forma versátil, ha pasado a ser también dominio de las máquinas y de las técnicas. Por ello nos encontramos en un nuevo período de «mudanza en el estado de las cosas» que podemos nombrar como revolución informacional.

Precisamente, porque la información se ha «externalizado» del hombre, la hemos descubierto como concepto significativo. Hasta ahora había pasado desapercibida como parte intrínseca y consustancial a la actividad humana. La información, como otros conceptos inherentes a la actividad del hombre (el tiempo y la energía), se pone de manifiesto cuando se «exterioriza», cuando el hombre la ve fuera de sí, cuando la manejan las máquinas.

3. RECONOCER COMO HEMOS LLEGADO HASTA AQUÍ

Conviene resaltar tres aspectos que, desde el principio, distinguen a la electrónica: su carácter aplicado (no es una disciplina teórica o de «investigación básica» sino de manejo efectivo de la información), la rápida difusión de sus productos, su relación directa con la gente (con las personas comunes, más allá de los profesionales o especialistas) y, con ello, su influencia en la vida cotidiana.

Con el transistor (a mitad del siglo XX) comienza un proceso continuo de reducción de la electrónica: todo se hace más pequeño, más corto, más rápido: se reduce no sólo el tamaño, sino también el consumo y el coste; también se hace más pequeño el tiempo de respuesta de los circuitos, el tiempo de desarrollo de los sistemas y el tiempo de su difusión pública. Ello ha permitido construir y poner rápidamente en nuestras manos sistemas electrónicos cada vez más complejos y potentes, de tamaño, consumo y costes muy reducidos.

A la electrónica la minimización «le viene de familia» (el electrón es diminuto y muy veloz, en cuanto a sus efectos) y el resultado es que, al hacerse tan pequeña y tan rápida, la electrónica se ha metido por todos los rincones de nuestra vida y de nuestra sociedad y ha promovido esa «mudanza en el estado de las cosas» que caracteriza nuestro presente: la revolución informacional.

La electrónica de la primera mitad del siglo XX se dedicó a la telecomunicación, en su doble aspecto: espacial y temporal; desarrolló la radiodifusión y la grabación del sonido (en discos mecánicos, cintas magnéticas y bandas ópticas de las películas sonoras), mejoró ampliamente la telefonía e inició la transmisión de imágenes (televisión).

A partir de los años 40, la electrónica aborda el control de procesos. La penetración en la industria de los sistemas de control electrónicos se ve favorecida por la introducción de dispositivos electrónicos de control de energía y por la posibilidad de abordar tareas complejas gracias a los circuitos integrados; de forma que, a partir de los años 70, la electrónica pasa a controlar todo tipo de proceso industrial y, desde los años 80, se incorpora masivamente dentro de los productos resultantes de la fabricación industrial.

A la vez, en esta segunda mitad del siglo XX, muy poquito a poco al principio pero de forma espectacular en el último cuarto de siglo, la electrónica ha ido asumiendo otra vertiente más abstracta y genérica: operar con la información en sí misma, representarla y manejarla a través de símbolos, lo que hoy en día entendemos por procesar la información.

El camino hacia la informatización lo habían abierto dos precursores distantes entre sí:

- Georges Boole, matemático inglés, que tuvo éxito en su empeño de construir un modelo matemático del pensamiento humano (de la forma de razonar), estableciendo las bases de la lógica proposicional (la forma de combinar proposiciones), a través de una estructura matemática que, andando el tiempo, sería conocida como álgebra de Boole (*Una investigación de las leyes del pensamiento*, publicado en 1854).[1]
- Claude E. Shannon, ingeniero norteamericano, que, al desarrollar un modelo matemático para tratar con las redes de múltiples conmutadores propias de la telefonía, identifica la interconexión de conmutadores como álgebra booleana y pone de manifiesto que también lo es el sistema binario de numeración (*Un análisis simbólico de los relés y circuitos de conmutadores*, publicado en 1938).[2]

Sobre las bases conceptuales que establecen Boole y Shannon se edifica la electrónica digital (soporte instrumental del procesamiento de la información), que alcanza su mayoría de edad en los años 70, cuando los circuitos integrados permiten configurar sistemas informáticos potentes y reducir su coste, hasta llegar (en los años 80) al microprocesador que hace viables los computadores personales.

Pero la electrónica propia de la informatización (la electrónica digital) no se limita a la configuración de sistemas propiamente informáticos sino que, desde sus inicios, se dedica también al control de procesos y, en buena medida, desplaza a la electrónica anterior (analógica). El microprocesador resuelve muy eficazmente el control de procesos industriales y la integración de circuitos de aplicación específica (ASICs) permite miniaturizar controles sumamente sofisticados para el interior de los productos fabricados en tales procesos.

Asimismo, hoy en día, la electrónica digital ha invadido y renovado el ámbito de las comunicaciones y los sistemas digitales han abierto nuevas alternativas (con extraordinarias prestaciones) en cuanto a almacenamiento de sonido e imagen, en cuanto a telefonía por microondas y, también, en radio y televisión.

4. LO SIMBOLICO FRENTE A LO ANÁLOGO

Las señales eléctricas son el soporte material de la información; según la manera de codificar la información (de representarla en forma de señales eléctricas) aparecen dos tipos de electrónica: la analógica y la digital.

La analógica representa las cantidades «por analogía cuantitativa» (a mayor cantidad, mayor tensión) según una relación de proporcionalidad directa, mientras que la digital utiliza símbolos a través de un proceso de codificación abstracta.

El nombre de «analógica» deriva de que la representación se hace «por analogía»: los valores de la señal eléctrica son «análogos en cantidad» a los de la magnitud física: hay una relación directa en términos de cantidad, una relación de proporcionalidad. El nombre de «digital» le viene de que utiliza dígitos: representa la información mediante «palabras» formadas por varios dígitos, a través de una codificación: es una representación simbólica que requiere un proceso de abstracción.

Un sensor adecuado transforma directamente la correspondiente magnitud física en tensión eléctrica analógica, pero se requiere una codificación posterior para que la señal resultante de la medida sea trasladada a la palabra binaria (al conjunto de señales) que corresponde a su representación digital. Por medio hay un código que establece la relación entre cada símbolo y la cantidad de tensión analógica que representa, cantidad que, además, depende de la posición (valor relativo) del símbolo en la palabra binaria.

Es indudable que se asume una complicación, un esfuerzo adicional, al pasar de la representación analógica a la digital. En la utilización digital de símbolos hay un esfuerzo intermedio importante que no resulta obvio: la representación en dígitos requiere una transformación cualitativa, una conversión abstracta en símbolos que, según el lugar que ocupan, representan cantidades diferentes.

¿Qué ganamos con ello?

- a) Precisión: los valores, una vez expresados en símbolos, están claramente identificados con absoluta precisión; en cuanto a tensiones analógicas, al utilizar éstas todo el rango de valores de tensión, dos valores próximos tendrán dificultades para diferenciarse mientras que, en el caso digital, corresponderán a dos palabras binarias diferentes (y su expresión en tensiones empleará para cada dígito dos valores distantes).

- b) Fortaleza frente a perturbaciones (frente al «ruido» electromagnético): las tensiones digitales utilizadas corresponderán a dos valores distantes mientras que las analógicas recorren todo el rango de valores, de forma que la más mínima perturbación modificará el valor que representan.
- c) Fortaleza frente a derivas o faltas de precisión de los circuitos: al operar con las señales eléctricas cualquier etapa analógica causará un cierto grado de error (una mínima desviación de tensión o un pequeño fallo de precisión) que, al actuar en un rango continuo supondrá un error en el valor de la magnitud resultante; la separación entre los valores de tensión que corresponden a los símbolos digitales anula el efecto de tales desviaciones.
- d) Capacidad de cálculo: la representación simbólica permite utilizar los mecanismos de cálculo propios del correspondiente sistema de numeración (en el caso digital, el cálculo en el sistema binario).
- e) Capacidad de razonamiento (de combinar proposiciones): el razonamiento es propio de la representación simbólica y de la combinación de símbolos (a través de las reglas de la lógica).

La electrónica digital, al trasladarnos al mundo de los símbolos, aporta precisión y fortaleza y nos transfiere al plano de lo abstracto que es el ámbito del cálculo y del razonamiento.

En tal sentido importa reiterar que «todo esto» (es decir, el procesamiento de la información, codificada en símbolos binarios) comenzó con los trabajos de Georges Boole y de Claude E. Shannon. 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; en las tres secciones siguientes se relata el detalle de su contenido.

5. PRIMER VOLÚMEN: I. SISTEMAS COMBINACIONALES [3]

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); además, 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 constituyen «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).

Se denomina puerta lógica a la realización física de una operación booleana. Las puertas con diodos (cap. 7), además de su utilidad como puertas individuales, sirven para apreciar la necesidad de buen acoplo 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, bloques programables tipo ROM, PAL y PLA.

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

- los transistores MOS se corresponden, casi idealmente, con los interruptores propios del álgebra de conmutadores, base conceptual para construir físicamente los sistemas digitales
- y, además, la integración CMOS es actualmente la forma habitual de realización de circuitos integrados digitales. A partir de los años 80, la tecnología 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).

No obstante, el apéndice A3 presenta, en forma resumida, la configuración de las puertas lógicas con transistores bipolares y las características propias de la familia TTL; y el apartado 10.1 describe la evolución de los circuitos integrados digitales y la situación actual en cuanto a utilización de las diversas series.

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 importante problema del «ruido» electromagnético que afecta a los circuitos digitales.

Además, el primer volumen incluye tres capítulos complementarios dedicados a aspectos tecnológicos (numerados como T1, T2 y T3).

En el primero de ellos (cap. T1) se explica, en forma conceptual, breve y sencilla pero con adecuada profundidad, el comportamiento de los semiconductores, sus dos tipos N y P y la unión PN con sus características de discriminación de polaridad y aislamiento eléctrico (cuando se encuentra en polarización negativa) y se desarrolla un modelo operativo de funcionamiento de los transistores MOS. Es un capítulo auxiliar muy útil para quienes no dominen (o, simplemente, necesiten repasar) la teoría de semiconductores.

En el segundo (cap. T2), se presenta el proceso de fabricación de circuitos integrados CMOS: las etapas básicas de dicho proceso, las diversas operaciones físico-químicas que se aplican y el detalle de los sucesivos pasos que conforman el proceso de integración. Además, se incluye un epígrafe con los datos 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 por unidad de área,...) para facilitar una idea precisa de la configuración atómica y de las propiedades eléctricas de cada zona semiconductor, conductora o aislante.

Asimismo, dentro de los aspectos tecnológicos, se analiza con mayor detenimiento el problema del «ruido» en los circuitos digitales (cap. T3), detallando las causas físicas de las interferencias electromagnéticas, los mecanismos que las producen y transmiten en relación con los circuitos digitales y las formas de evitar o reducir los efectos de tales interferencias.

Tres apéndices describen, respectivamente, el método de simplificación Quine-McCluskey (que es la base de los algoritmos informáticos de simplificación de funciones booleanas), la propagación rápida de acarreo (para evitar largos tiempos de respuesta en los sumadores de números binarios de muchos dígitos) y las puertas lógicas con transistores bipolares (abarcando tanto las puertas discretas como la familia lógica TTL).

6. SEGUNDO VOLÚMEN: II. SISTEMAS SECUENCIALES [4]

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 su comportamiento.

El proceso de diseño secuencial (cap. 12), a partir del grafo de estados, de su simplificación (si es posible) 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 funciones de 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. Para ello es necesario introducir una señal de reloj, cuyos flancos señalarán el paso de una unidad de tiempo a la siguiente, y disponer de biestables síncronos que solamente cambian en dichos flancos (cap. 13); la combinación de biestables con funciones previas en configuración PAL da lugar a circuitos integrados programables (CPLDs), 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 del estado (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 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 los espurios (*glitches*) 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.

Un registro es un conjunto de biestables y sirve para almacenar una palabra binaria (capítulos 11 y 13). Los contadores (cap. 16) son un tipo especial de registros que evolucionan entre números binarios consecutivos (pasan de un número al siguiente o viceversa) y que sirven para contar pulsos y para dividir frecuencias; aunque son circuitos secuenciales, debido a que suelen tener muchos estados (si bien muy ordenados entre sí), su diseño requiere una metodología propia.

Los contadores son bloques secuenciales sumamente útiles en el diseño de sistemas de medida y de control, debido a la gran variedad de aplicaciones que ofrecen (cap. 17): contaje y control de número de objetos y de sucesos, medida de tiempos (herramienta específica para manejar el tiempo), medida de frecuencias y de número de revoluciones,...

Una aplicación más sofisticada de los contadores, la modulación de anchura de pulsos, merece particular atención (cap. 18); 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 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,...

Algunos sistemas digitales necesitan almacenar en su memoria grandes cantidades de datos, para ello los registros se agrupan en amplios bloques, denominados memorias (cap. 19); 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 solo lectura ROM) y, también, incorporar dentro de la memoria los periféricos de entrada y de salida (cap. 20); 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.

Además, este segundo volumen incluye dos capítulos complementarios dedicados a aspectos tecnológicos, referidos a circuitos auxiliares, complementarios de los propiamente digitales y necesarios, respectivamente, para la gestión del tiempo (cap. T4) y para la relación con el mundo exterior, básicamente analógico (cap. T5). El primero describe los 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 trata de 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.

Dos pequeños apéndices describen los contadores asíncronos construidos directamente con biestables T en serie, y los bloques de memoria dinámica, que ofrecen amplias capacidades de memoria pero necesitan refrescar continuamente la información almacenada.

7. TERCER VOLÚMEN: III. MICROELECTRÓNICA DIGITAL [5]

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 circuito 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 y para ello disponemos de dos alternativas:

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

Cinco capítulos desarrollan el proceso de diseño y «construcción circuital» de un sistema digital en forma microelectrónica (que es la forma actual de llevar a cabo tal diseño). Los dos primeros tratan de las dos opciones antes indicadas para obtener un circuito integrado con un diseño específico completo (programación o fabricación del diseño); ambas opciones utilizan el mismo esquema de desarrollo del proceso de diseño, el mismo tipo de herramientas y las mismas consideraciones metodológicas a tener en cuenta.

El primer capítulo (cap. 21) presenta las diversas posibilidades de programación y fabricación que permiten obtener un circuito integrado con un diseño específico completo; ambas opciones utilizan el mismo esquema de desarrollo del proceso de diseño, el mismo tipo de herramientas y las mismas consideraciones metodológicas a tener en cuenta.

El segundo (cap. 21) repasa la configuración de macroceldas y CPLDs (dispositivos programables ya introducidos en el 2º volumen) y describe, en detalle, la configuración y posibilidades de los circuitos integrados programables de tipo avanzado (FPGAs).

El diseño microelectrónico se desarrolla habitualmente con la ayuda de un lenguaje de descripción circuital, de los cuales el más utilizado es el VHDL (cap. 23). 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 microelectrónica permite abordar sistemas digitales muy complejos y resulta conveniente considerar las pautas o «formas de actuar» que orienten y faciliten el diseño complejo (cap. 24); 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.

Además, la microelectrónica exige plantear el problema del test de fabricación (cap. 25); 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.

También 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. Los cuatro capítulos que (al igual que en los dos volúmenes anteriores) se agrupan bajo la denominación de «aspectos tecnológicos» pretenden presentar un modelo básico conceptual y operativo de la tecnología, que facilite la comprensión de sus posibilidades, sus prestaciones, sus limitaciones y sus exigencias (los requisitos que la tecnología impone sobre el diseño).

El capítulo T6 desarrolla un modelo funcional del comportamiento de los transistores MOS que permite una representación gráfica de la distribución de carga en el canal de dichos transistores y, sobre ella, efectuar cálculos relativos a tensiones, intensidades, tiempos y consumos. A partir de dicho modelo, se estudian en detalle las características del inversor CMOS (cap. T7), como prototipo de las puertas inversoras, y se analizan las puertas pseudoNMOS y las puertas de transmisión (cap. T8), como alternativas de interés para determinadas configuraciones; asimismo, se introduce la lógica dinámica.

El capítulo T9 se dedica a cuestiones diversas que completan el panorama de un circuito integrado global: entradas y salidas, densidad de integración, reglas de diseño físico,...

Tres apéndices incluyen, respectivamente, algunos ejemplos de diseño VHDL de sistemas de control, la presentación del simulador SPICE como herramienta de simulación eléctrica del comportamiento y características de las puertas o módulos digitales y la posibilidad de incluir etapas analógicas complementarias dentro del mismo integrado digital: ASIC mixto.

8. RUEGOS Y AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a todos los compañeros del departamento de ingeniería electrónica y comunicaciones de la Universidad de Zaragoza sus aportaciones y su ayuda cotidiana, y a quien utilice este libro para su personal esfuerzo de estudio la confianza que deposita en su labor como profesor; asimismo, agradece a los profesores y estudiantes de la especialidad de Electrónica Industrial de la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza la amistad, colaboración, ilusión y esfuerzo que comparten día a día.

También agradecerá efusivamente cualquier sugerencia o propuesta que contribuya a mejorar el texto, a clarificar las ideas que expresa o a facilitar su estudio y, a la vez, ruega que se le avise de cualquier error, errata o incorrección que se detecte.

9. BIBLIOGRAFÍA

[1] G. Boole, “An investigation of the laws of thought”, Walton and Maberley, London, 1854. (Reprinted by Dover Books, New York, 1954). Hay traducción española: “Investigación sobre las leyes del pensamiento”, Editorial Paraninfo, Madrid, 1982.

[2] Claude E. Shannon, “A symbolic analysis of relay and switching circuits”, Transactions American Institute of Electrical Engineers, vol. 57, pp. 713-723, March 1938.

[3] T. Pollán, “Electrónica Digital. I. Sistemas Combinacionales”, Prensas Universitarias de Zaragoza, Colección Textos Docentes nº 97, Universidad de Zaragoza, 2003.

[4] T. Pollán, “Electrónica Digital. II. Sistemas Secuenciales”, Prensas Universitarias de Zaragoza, Colección Textos Docentes nº 102, Universidad de Zaragoza, 2004.

[5] T. Pollán, “Electrónica Digital. III. Microelectrónica”, Prensas Universitarias de Zaragoza, Colección Textos Docentes nº 105, Universidad de Zaragoza, 2004.