

0 LA ELECTRÓNICA COMO TÉCNICA DE LA INFORMACIÓN CODIFICACIÓN DIGITAL <> REPRESENTACIÓN ANALÓGICA

0.1. Objeto de la electrónica

0.2. Un breve paseo por la historia

0.3. Lo análogo y lo simbólico: dos electrónicas diferentes

0.4. Panorama general de la electrónica digital

La historia de las cosas ayuda mucho en la comprensión de las cosas mismas, ayuda a entrar en la esencia misma de las cosas, a no quedarnos en la superficie, a formular su porqué y para qué, sus relaciones y sus limitaciones.

¿A qué se dedica la electrónica? ¿Cuál es su objeto propio?

¿Cómo ha sido el desarrollo histórico de la electrónica? ¿Qué tareas ha desempeñado a lo largo del mismo? ¿Qué aspectos caracterizan a la electrónica?

¿Por qué dos electrónicas: analógica y digital? ¿Cuáles son las formas, métodos y maneras de cada una de ellas?

¿Qué contenidos conforman la electrónica digital? ¿Cómo están organizados en este texto y por qué?

Éstas son las preguntas que intenta responder esta introducción, los aspectos que desea dejar claros este capítulo previo.

[Esta primera página en cada capítulo pretende ser una introducción, justificación y resumen del propio capítulo; en este caso, no tiene mucho sentido escribir una «introducción de la introducción» y, por ello, ha quedado reducida a un conjunto de preguntas.]

0.1. Objeto de la electrónica

¿A qué se dedica la electrónica? ¿Cuál es el objeto de esta disciplina?

La denominación de «electrónica» resulta equívoca, ya que no expresa ni la finalidad ni el objeto propios de esta materia, sino que alude a lo que utiliza: dispositivos basados en el comportamiento del electrón. Es, pues, una nominación instrumental, pero no funcional ni finalista: dice lo que la electrónica usa pero no indica lo que hace, ni sus objetivos propios.

La palabra electrónica pone de manifiesto el aprovechamiento de las propiedades de los electrones: estas partículas son diminutas (10^{-12} cm), sus efectos son muy rápidos (300.000 Km/s) y llevan carga eléctrica (capaces, por tanto, de ser portadores de señales eléctricas). Aprovechando tales propiedades, la electrónica utiliza dispositivos (llamados electrónicos) conectados formando circuitos que operan con señales eléctricas.

También las señales eléctricas presentan, de por sí, buenas propiedades: son fáciles de transmitir, de detectar y medir, de amplificar, de transformar, de combinar entre sí,... Existe, además, una amplia diversidad de transductores que realizan la transferencia entre otras magnitudes físicas y tensiones eléctricas (sensores) y viceversa (efectores).

La electrónica emplea dispositivos electrónicos, los cuales actúan sobre señales eléctricas. Pero eso no explica la finalidad propia de la electrónica, ni tampoco aclara el interés y la importancia de esta disciplina ni su utilidad: pocas personas y pocas entidades adquirirían o usarían equipos electrónicos con el simple objetivo o por el mero placer de manipular señales eléctricas.

Lo que realmente maneja la electrónica es información: las señales eléctricas interesan como portadoras de información y la electrónica opera eficientemente con ellas en su finalidad propia de manejar la información.

Una definición adecuada, a la vez finalista e instrumental, podría ser la siguiente: la electrónica es una técnica de manejo de la información, codificada en señales eléctricas, utilizando dispositivos que aprovechan las propiedades de los electrones.

¿Cómo se maneja la información? ¿Qué tareas interesa hacer con ella?

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 eléctricas 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.

La electrónica es, hoy por hoy, la base técnica más eficaz que dispone el hombre para manejar la información y tal eficacia le viene de las propiedades de los electrones y de las buenas características de las señales eléctricas: por ello, manejamos la información en forma de señales eléctricas y utilizamos para ello dispositivos electrónicos.

0.2. Un breve paseo por la historia

La electrónica ha ido abordando sucesivamente los tres grandes ámbitos de tareas de manejo de la información antes descritos (telecomunicación, automatización e informatización) y lo ha hecho en el mismo orden en que los hemos enumerado.

La electrónica emerge desde la electricidad que fue la gran protagonista de la física del siglo XIX. Los precursores del mundo eléctrico (Ampere, Coulomb, Faraday, Gauss, Henry, Kirckoff, Ohm, Volta,...), muchos de ellos a caballo entre los siglos XVIII y XIX, fueron sentando las bases de la electricidad y el magnetismo y las tradujeron en multitud de leyes parciales.

A partir de estos conocimientos dispersos, Maxwell realiza una gran síntesis unificadora, el electromagnetismo (1868), en la cual, al entrelazar la electricidad con el magnetismo, aparece un fenómeno novedoso: las ondas electromagnéticas. Dieciocho años más tarde (1886), Herz logra producir y detectar dichas ondas en su laboratorio y, muy pronto, Marconi las aprovecha para la comunicación sin cable.

Son tiempos en que ya se había desarrollado la comunicación a distancia (telégrafo: Morse, 1837, y teléfono: Bell, 1876) y la conservación del sonido en soporte material (gramófono: Edison, 1877).

La electricidad había ofrecido tres tipos de recursos tecnológicos: una energía fácilmente transportable, nuevas y mejores máquinas y la comunicación a gran distancia a través de cable. La búsqueda de comunicación a distancia sin cable condujo a la electrónica; en los albores del siglo XX (1901) Marconi logra que sus mensajes de puntos y rayas (código morse) crucen el atlántico y Auvrey (1906) consigue modular las ondas, de forma que el sonido cabalge sobre ellas.

La electrónica aparece cuando Lee de Forest introduce el primer dispositivo amplificador: el tríodo (1907). Las experiencias anteriores de telecomunicación (relacionadas con el telégrafo inalámbrico) estaban «pidiendo a gritos» un buen amplificador de señales: de la energía que el emisor lanza en todas las direcciones (ya de por sí pequeña) la parte que recoge un receptor lejano es mínima; poder amplificar la energía recibida modifica cualitativamente la eficiencia de la transmisión.

Lee de Forest aporta un dispositivo que, aprovechando el comportamiento de los electrones, sirve para amplificar señales eléctricas, iniciando la electrónica de válvulas cuya aplicación y desarrollo ocupa la primera mitad del siglo XX. Una década después (Pittsburg 1921), la radiodifusión comienza sus primeros pasos y pronto proliferarían las emisoras de radio y los receptores radiofónicos serían de uso común en los países desarrollados.

Conviene resaltar estos aspectos que, desde el principio, distinguen a la electrónica: su carácter aplicado (no es una disciplina teórica o de investigación 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.

Un nuevo rasgo entra en escena y acelera el desarrollo y la utilidad de la electrónica en la segunda mitad del siglo XX: un continuado proceso de miniaturización. En 1949 los trabajos del equipo científico de la Bell Telephone condujeron a la fabricación del primer transistor, reduciendo el tamaño del dispositivo amplificador en un factor cercano a 100.

Con el transistor 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 (con lo cual trabajan mucho más rápido y mejor), el tiempo de desarrollo de los sistemas (desde que se tiene una idea funcional hasta que el equipo está disponible) y el tiempo de su difusión pública (de su utilización por la gente).

Este proceso de miniaturización ha continuado en la década de los 60 con el desarrollo de los circuitos integrados, cuya densidad de integración ha ido progresivamente en aumento. 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. Los intereses bélicos, en torno a la segunda guerra mundial impulsaron la investigación y desarrollo de sistemas electrónicos de control (para control de tiro y, también, para localización de aviones por medio del radar).

La penetración en la industria de los sistemas de control electrónicos se ve favorecida por la introducción de dispositivos electrónicos de control de energía (tiristores y triacs) 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).
- 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).

Sobre las bases conceptuales que establecen Boole y Shannon se edifica la electrónica digital (soporte instrumental del procesamiento de la información), que alcanzará su mayoría de edad en los años 70, cuando los circuitos integrados permitan 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.

0.3. Lo análogo y lo simbólico: dos electrónicas diferentes

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.

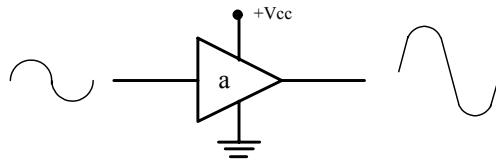
Tomemos el ejemplo de un termómetro analógico y otro digital; el primero representa la temperatura mediante una columna de mercurio (a mayor temperatura mayor longitud de la columna), en cambio el digital proporciona unos signos numéricos (que es preciso interpretar por referencia a un determinado código). Si observamos que la columna de mercurio ha aumentado, sabemos que ha subido la temperatura; en cambio, entre una indicación digital de 19° y otra de 23° no es obvio cuál de ellas indica mayor temperatura (solamente la interpretación de los símbolos, a través del código numérico, permite resolver la comparación).

0.3.1. Electrónica analógica

La electrónica analógica representa los valores de una magnitud física mediante una tensión, a través de una relación de proporcionalidad $V(t) = k \cdot \mathcal{M}(t)$; se utiliza una sola tensión, una constante de proporcionalidad relaciona la tensión con el valor que representa y el rango de valores de la tensión es continuo, entre dos valores extremos $V_{\text{máx}}$ y $V_{\text{mín}}$.

Para trasladar el valor de la magnitud física a la correspondiente tensión se necesita un sensor adecuado (transductor magnitud física -> señal eléctrica).

El dispositivo básico de la electrónica analógica es el amplificador, el cual suministra una tensión de salida proporcional a la tensión de entrada $V_o = a \cdot V_i$, a expensas de recibir una energía eléctrica desde una fuente de alimentación V_{CC} .



El amplificador se construye con dispositivos amplificadores (triodos o transistores), enmarcados en un circuito de polarización (ubicación en el punto de operación adecuado para que reciban la energía de la fuente de alimentación).

Pueden diseñarse muy diversas etapas amplificadoras (de tensión, de intensidad o de ambas) y, con ellas, puede construirse un amplificador de muy alta ganancia y características ideales, el amplificador operacional, que permite configurar bloques correspondientes a operaciones aritméticas (sumadores, restadores, comparadores, integradores, derivadores,...); tales bloques constituyen los módulos básicos para el control de procesos (automatización).

Asimismo, razonando en el espectro de frecuencias, con la correspondiente ayuda de condensadores y bobinas, las etapas amplificadoras pueden transformarse en filtros, sintonizadores, demoduladores, moduladores, amplificadores de antena,... que son los módulos básicos para la comunicación por ondas (telecomunicación).

Las matemáticas propias de la electrónica analógica son las que corresponden a la proporcionalidad, las operaciones lineales (suma, resta, producto por una constante, derivada, integral). Más específicamente, el control de procesos se basa conceptualmente en la realimentación y en la teoría derivada de ella que recibe el nombre de regulación automática, mientras que la telecomunicación utiliza el dominio de la frecuencia, apoyándose en la descomposición en serie de Fourier (espectro de frecuencias).

0.3.2. Electrónica digital

Los sistemas digitales representan cada valor de una magnitud física mediante un conjunto de dígitos o cifras, cada uno de los cuales admite varias posibilidades o símbolos. Por ejemplo, en el sistema de numeración decimal, cada dígito tiene diez posibilidades (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9).

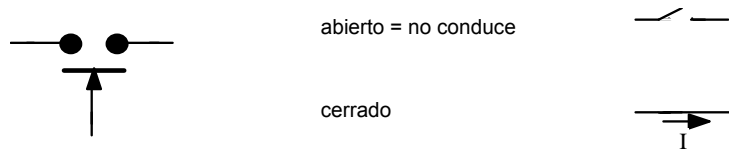
La electrónica digital es binaria, es decir, cada dígito admite solamente dos posibilidades, que solemos expresar con los símbolos **0** y **1** (también, con los símbolos **L** y **H**), de forma que el sistema de numeración que le es propio es el sistema de base 2 (binario).

La electrónica digital representa los valores de una magnitud física mediante **m** señales eléctricas, cada una de las cuales admite solamente dos valores de tensión que corresponden a los símbolos **0** y **1**; para expresar un solo valor de la magnitud se necesitan **m** señales, la relación se establece mediante un proceso abstracto de codificación y el rango de cada señal es discontinuo, reducido a dos únicos valores $V_{\text{máx}}$ y $V_{\text{mín}}$ (por ejemplo, 0V y 5V).

Para trasladar el valor de la magnitud a la correspondiente representación digital es preciso utilizar el sensor que transforma la magnitud en tensión analógica, seguido de un conversor analógico-digital que aplique el correspondiente código.

Por ejemplo, un sensor de temperatura aplicado a una temperatura de 17° puede proporcionar una tensión de 4,25 V (factor de proporcionalidad 1/4) y el conversor analógico-digital debe transformar dicha tensión en **10001** (que corresponde al número 17 en binario), que, en realidad, serán cinco tensiones en los terminales de salida del conversor: 5V 0V 0V 0V 5V.

El dispositivo básico de la electrónica digital es el conmutador o interruptor (con dos estados: abierto \equiv no conduce y cerrado \equiv conduce).



Al igual que en el caso del amplificador, el interruptor puede construirse con transistores (también podría hacerse con triodos); para amplificadores se utiliza la zona lineal de operación del transistor mientras que para interruptores se emplean los extremos de dicha zona: corte ($I = 0$) y saturación ($V = 0$).

Con interruptores (transistores) se construyen puertas lógicas (capaces de efectuar operaciones booleanas individuales) y agrupando dichas puertas se configuran funciones booleanas que son la base relacional de las variables digitales. Determinados conjuntos de funciones booleanas de utilidad general se agrupan en bloques combinatoriales que, junto con los bloques con memoria (biestables, registros y contadores) constituyen los módulos básicos para el diseño digital. Los biestables provienen de establecer realimentación dentro de una función booleana y con ellos se configuran los registros y los contadores. En definitiva, todo en los sistemas digitales son funciones booleanas, las cuales se componen de conjuntos de puertas lógicas, construidas con interruptores.

Por ello, la matemática propia de la electrónica digital es el álgebra de Boole: las funciones booleanas expresadas como combinación de operaciones del álgebra booleana. Complementariamente, los grafos de estado son una herramienta auxiliar apropiada para describir el comportamiento de los circuitos digitales con memoria.

0.3.3. Lo análogo frente a lo simbólico

El nombre de «análogo» deriva de que la representación (de la magnitud física en tensión eléctrica) 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 análoga, 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 análoga que representa, cantidad que, además, depende de la posición del símbolo en la palabra binaria (cada dígito presenta diferente valor relativo).

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 (entre dos extremos), 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).

Por ejemplo, utilizando el intervalo de 0 a 5 V para representar analógicamente las temperaturas de 0 a 100°, sendas temperaturas de 19° y 20° corresponderán a valores de tensión de 0,95 V y 1,00 V, que resultan muy próximos entre sí, mientras que sus palabras digitales serán **10011** y **10100**, claramente diferentes, y el conjunto de tensiones que corresponde a su representación digital serán, respectivamente:

5V 0V 0V 5V 5V y 5V 0V 5V 0V 0V.

- b) *Fortaleza frente a perturbaciones (frente al ruido electromagnético)*: las tensiones digitales utilizadas corresponderán a dos valores distantes (por ejemplo 0V y 5V) mientras que las tensiones analógicas recorren todo el rango de valores (entre 0V y 5V), 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 al **0** y al **1** 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.

0.4. Panorama general de la electrónica digital

El estudio de los sistemas digitales suele dividirse en dos grandes partes dedicadas, respectivamente, a los sistemas combinatoriales y a los sistemas secuenciales; ambos se diferencian entre sí por la existencia de memoria en los segundos, mientras que en los primeros las salidas son función directa de los valores presentes en sus entradas.

0.4.1. Sistemas combinatoriales

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 combinatoriales. 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 combinatoriales 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 combinatoriales 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 combinatorial específico propio de un diseño particular.

Una vez recorridos «los cimientos y el almacén de piezas» de los sistemas lógicos combinatoriales (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 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; tal opción 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
- y, además, la integración CMOS es, actualmente, la forma habitual de realización de circuitos integrados digitales. A partir de los años 80, 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).

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 10.3 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, este 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.

Después de la teoría de semiconductores, se presenta el proceso de fabricación de circuitos integrados CMOS (cap. T2): 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 detenimiento el problema del ruido en los sistemas 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 sus efectos.

0.4.2. 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 (la 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. 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, 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 (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 afecciones 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 (los contadores son la 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.

Dos capítulos, dedicados a aspectos tecnológicos, se refieren 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.

0.4.3. 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») y para ello disponemos de dos alternativas:

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

El estudio de la microelectrónica debe atender a dos aspectos diferenciados:

- por un lado, el proceso de diseño de un circuito particular (para una aplicación específica) y las posibilidades de programación o de fabricación del mismo,
- y, de otro, la tecnología como soporte material sobre el cual se va a configurar el circuito resultante de nuestro diseño.

En primer lugar, 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; y considerar luego, en mayor 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, 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. Complementariamente, se detallan en un apéndice (ap. A6) diez ejemplos de diseño VHDL de sistemas de control, incluyendo en ellos máquinas algorítmicas (dedicadas a cálculos numéricos) y diseños «amplios» de sistemas habituales.

La microelectrónica permite abordar sistemas digitales muy complejos y resulta muy adecuado 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. Cuatro capítulos, de los etiquetados como «aspectos tecnológicos», presentan un modelo básico conceptual y operativo de la tecnología, que facilita la comprensión de sus posibilidades, sus prestaciones, sus limitaciones y sus exigencias (los requisitos que la tecnología impone sobre el diseño).

El primero de ellos (cap. 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.

Por último (cap. T9), se consideran cuestiones diversas que completan el panorama de un circuito integrado global: entradas y salidas, densidad de integración, reglas de diseño físico,..., así como (ap. A7), la posibilidad de incluir etapas analógicas complementarias dentro del mismo integrado digital (ASICs mixtos) y el simulador SPICE (ap. A8) como eficaz herramienta de simulación eléctrica del comportamiento y características de las puertas o módulos digitales.