

Capítulo 2

Introducción

2.1. Presentación del capítulo

Hubiera preferido que este capítulo no existiera, y haber empezado directamente con un circuito electrónico. Sin embargo me parecía que esto simplemente no era posible. Pido al lector benevolencia y atención, porque lo bueno empieza, realmente, un poco más adelante.

2.2. ¿Qué es la electrónica?

2.2.1. Un poco de perspectiva

La electrónica evoluciona a partir de la física en la medida en que el descubrimiento de nuevos componentes (denominados electrónicos) abren perspectivas inesperadas: primero las lámparas termoiónicas (a principio del siglo XX), luego los transistores (años 50) y por último los circuitos integrados (años 60) marcan una evolución imparable. La electrónica tiene una historia muy corta. A pesar de todo, es algo sorprendente el grado de madurez alcanzado en tan poco tiempo. Esto ha sido debido a grandes hombres, que dan dejado huellas imborrables.

En poco tiempo surge la especialización, y se convierte en un área muy compleja, que tras el nombre surge un apellido: electrónica analógica y digital. La segunda está rodeada de una aureola de calidad, pero esto obedece más al efecto de un marketing específico que a la lealtad con la realidad.

La electrónica es una ingeniería, aunque es posible afrontarla de un modo muy empírico y muy poco formal. Es muy susceptible de usarse la prueba y el error (método que no es válido por ejemplo en la arquitectura, aunque se usa profusamente en la medicina). Muchas personas afirman que están gobernada por leyes derivadas de la Magia Negra. Sin embargo, la experiencia muestra que si la razón se usa adecuadamente¹, con mayor o menor dificultad es posible explicar todo desde un punto de vista formal.

¹Desde la Ilustración, en occidente se entiende la razón como la medida de las cosas: lo que yo entiendo es razonable y lo que no soy capaz de entender, no lo es. De este modo es posible decir -incluso con décadas de experiencia profesional- que la electrónica es Magia Negra. Lo que yo no entiendo es incompresible.

Sin embargo, esta es una visión muy pobre y reducida de la razón: esta es, por naturaleza, apertura a la realidad. Si hay algo que no comprendo, debo estar abierto a posibles explicaciones a este hecho. Si mis hipótesis no son capaces de explicar un aspecto, debo tratar de profundizar en la veracidad del fenómeno o de la hipótesis pero nunca censurarlo como si no existiera.

2.2.2. Inciación a la electrónica

Parece una persona que quiere iniciarse, lo mejor es empezar por las revistas (Elektor, Resistor, Nueva Electrónica). Asimismo existen libros muy buenos y otros, no tan buenos². Pero antes de hacer una compra, conviene echar un vistazo al contenido.

Los kits de circuitos suelen ser una buena forma de introducción, pero no facilitan por sí mismos el aprendizaje, ya que cada vez más, y con objeto de reducir costos, se tienden a reducir las explicaciones del funcionamiento a la mínima expresión. Asimismo, el uso intensivo de circuitos integrados en los kits permite obtener precios muy ajustados, pero dificultan enormemente las explicaciones didácticas y la experimentación.

2.3. Magnitudes Básicas

Para explicar la electricidad, tradicionalmente se ha usado el símil hidráulico, que es bastante apropiado. Haremos referencia a él.

2.3.1. Corrientes

La corriente eléctrica es una medida del número de electrones que pasa por un conductor por unidad de tiempo. En el símil hidráulico, se asocia al caudal: la cantidad de agua que atraviesa una tubería por unidad de tiempo.

Se mide en Amperios (A). Un Amperio es igual a un Culombio por Segundo. Un electrón tiene una carga de $3,6 \cdot 10^{-18}$ culombios. Una corriente de 1A corresponde, por tanto, a $2,78 \cdot 10^{17}$ electrones/sec. Parece mucho, pero no es tanto, si consideramos a la velocidad a la que llegan a trabajar algunos circuitos electrónicos, y a las bajas corrientes a las que lo hacen.

Resumiendo: la corriente eléctrica es una magnitud que *atraviesa, que recorre* un circuito.

2.3.2. Tensiones

La tensión es una medida de la diferencia de potencial, diferencia de alturas. No es, por tanto una medida absoluta, sino 'algo' que existe necesariamente entre dos puntos de un circuito. Sin embargo, comunmente se obvia esta cuestión, refiriéndose todas las medidas de tensión a una referencia que se denomina *masa*.

Se mide en Voltios (V).

En ocasiones se denomina *voltaje*, pero *tensión* es una expresión más elegante.

²Y todo ello por lealtad a la realidad. Sin esta lealtad no se puede ser un hombre pleno, ni siquiera un electrónico competente y apasionado. Puede parecer una disquisición filosófica fuera de contexto, pero está en la base de la postura que una persona tiene ante un circuito que no funciona, o que parece que funciona.

Un ejemplo especialmente significativo es el descubrimiento de la radiación de fondo. En 1965, Arno Penzias y Bob Wilson hacían medidas con un radiotelescopio con longitudes de onda de 7 cm, del que habían calculado con precisión el ruido que aportaba a las señales estelares recibidas. Los ingenieros observaron que el ruido recibido era algo más alto, y que este ruido no dependía de la dirección en la que apuntaran el radiotelescopio. Concluyeron que este ruido eléctrico -de muy bajo nivel- era una radiación residual del Big Bang.

²Sin duda, el presente pertenece a la primera categoría :-)

2.3.3. Resistencias

La resistencia, como su nombre indica, es la medida de la dificultad que presenta un circuito al paso de la corriente eléctrica. Sería algo que tiene que ver con la sección o la forma de la tubería. Es una magnitud intrínseca a un componente, a cualquier conductor.

Se mide en Ohmios (Ω).

Una magnitud semejante a la resistencia es la *impedancia*. Tiene la misma magnitud y representa igualmente una dificultad de paso, pero en este caso, lo hace sin generar calor como en el caso de una resistencia. En el apartado 2.5 ahondaremos más en ello.

2.3.4. Tiempo y frecuencia

El tiempo no es necesario definirlo. Pero se abren ante nosotros medidas de tiempos nuevos: desde los nanosegundos a los segundos (ver apartado 2.3.5)

La frecuencia se usa para caracterizar señales periódicas: mide cuantas veces se repite el patrón básico en la unidad de tiempo. Si el periodo de este patrón básico se denomina T y la frecuencia F , resulta:

$$F = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$

Las frecuencias, se miden en ciclos por segundo, y de forma más propia en Hertzios, que se abrevian en Hz (la primera mayúscula y la segunda minúscula).

Ejemplo: la nota musical LA tiene una frecuencia de 440 Hz. Esto quiere decir que los picos de las ondas de presión se repiten cada 2,27 ms.

2.3.5. Multiplicadores

Se denominan multiplicadores a prefijos que usamos para indicar magnitudes más o menos pequeñas. Han sido definidas por el Sistema Internacional de medidas, y los usamos alguno de ellos muy comunmente. Los más habitales en la electrónica son:

Prefijo	Nombre	Factor
M	Mega	10^6
K	Kilo	10^3
m	mili	10^{-3}
μ	micro	10^{-6}
n	nano	10^{-9}
p	pico	10^{-12}

Existe una costumbre que puede resultar algo chocante. Las copadoras defectuosas añaden pequeños puntitos en cualquier lugar, y al fotocopiar un esquema un par de veces entra la duda de si donde dice 47 no serán 4,7. Pues para evitar este tipo de dudas, es muy común que para nombrar el valor de un componente, en la posición del punto decimal se escriba el factor de escala. De este modo podemos decir que una

resistencia tiene un valor de 3k3, lo que quiere decir que vale 3,3 k Ω ó 3300 Ω , o que un condensador tiene 4p7, que es igual a 4,7 pF.

Se observará asimismo que como el símbolo Ω es algo difícil de escribir, es normal nombrar a las resistencias como R, k o M, para indicar su valor en Ohmios, kilo-ohmios o Mega-Ohmios. Así pues en un esquema es habitual usar la expresión 4R7 para una resistencia de 4,7 Ω .

2.3.6. Señales continuas

Una señal continua es aquella que no varía su magnitud con el tiempo o lo hace de manera muy lenta. Por ejemplo, una pila es una fuente de tensión continua.

Una señal continua está caracterizada por el valor de su magnitud. En el ejemplo anterior, 1,5 Voltios para una pila de carbón-zinc.

2.3.7. Señales alternas

Una señal alterna es aquella que varía con el tiempo.

Ejemplos de señales eléctricas alternas son: la tensión de la red de distribución eléctrica, la señal proveniente de un micrófono³ que capta una conversación, o el campo eléctrico y magnético radiado por una emisora de radiofrecuencia.

De todas las señales alternas, hay un grupo de ellas especialmente interesante: se trata de las *señales sinusoidales*. Se trata de señales periódicas con forma de ola, matemáticamente descritas por la ecuación:

$$x(t) = A \cdot \cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \quad (2.2)$$

En la fórmula, A representa la *amplitud de pico*, esto es, el valor máximo, y tiene la magnitud de la señal. La constante T representa el *periodo* de la señal, y tiene magnitud de tiempo.

Se denomina *fase* al término entre paréntesis de la ecuación 2.2. Tiene dimensiones angulares y se mide en grados o radianes⁴.

En la figura 2.1 podemos ver una representación de una señal sinusoidal.

Ejemplo: La tensión de la red de distribución eléctrica de 220 Voltios eficaces, tiene una tensión de pico de 311 Voltios, y un periodo de 20 ms, que corresponde a una frecuencia de 50 Hz.

2.4. Aparato Matemático básico

Del mismo modo que un libro de carpintería no se concibe sin el recurso a dimensiones de las piezas, un libro como el nuestro necesita de matemáticas y montajes. Algunas cosas se pueden simplificar enormemente, pero las matemáticas son imprescindibles.

³El micrófono es un aparato que convierte variaciones de presión del aire, en movimiento, y este en una débil corriente eléctrica. Para un mayor detalle, ver el apartado 7.5.1.

⁴Una circunferencia (o si se prefiere, un periodo) tiene 360 grados o 2π radianes.

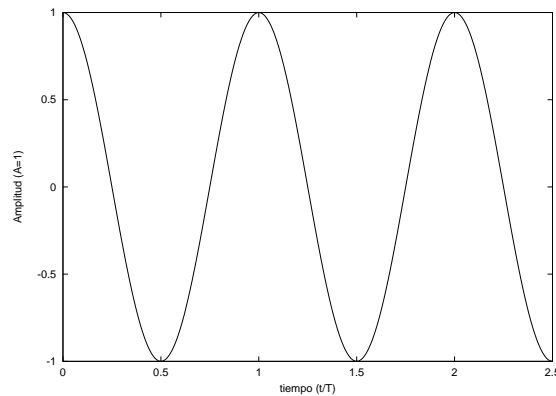


Figura 2.1: Forma de onda sinusoidal

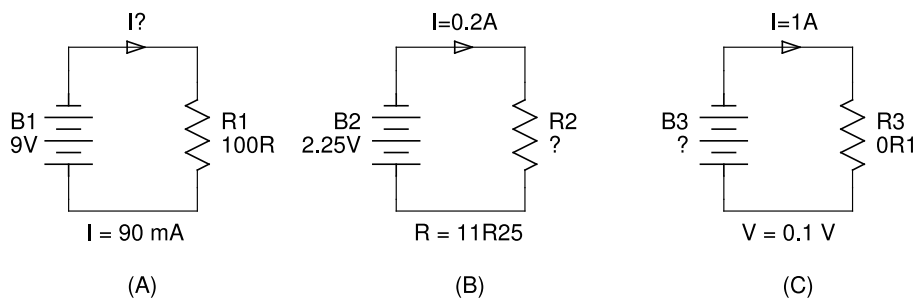


Figura 2.2: Ejemplos aplicación de la Ley de Ohm

2.4.1. Las 'tres' Leyes de Ohm

La Ley de Ohm es sólo una, pero hay que aprenderse de memoria sus tres variantes:

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.3)$$

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.4)$$

$$V = I \cdot R \quad (2.5)$$

Las Leyes de Ohm indican la relación que hay entre la corriente eléctrica (I) que pasa por una resistencia (R) y la tensión que hay en bornes de ellas (V).

Esto quiere decir que la resistencia de un circuito, la corriente que lo atraviesa y la caída de potencial están ligadas: no son independientes.

Veamos unos ejemplos, ilustrados en la figura 2.2:

1. Si tenemos un conductor resistivo con un valor de 100Ω , y lo conectamos a una fuente de tensión (por ejemplo una pila de 9 Voltios), la corriente que circula por el circuito está ya determinada, no puede ser cualquiera. Lo podemos calcular y es de $I = \frac{V}{R} = \frac{9}{100} = 90 \text{ mA}$

2. Cogemos una bombilla de linterna y en el casquillo vemos la leyenda $V=2,25$ Volt, $I=0,2$ A. Esto quiere decir que cuando se conecta a una fuente de tensión de 2,25 Voltios (una pila, aunque no hay pilas de esta tensión), la corriente que la atraviesa es de 0,2 A. El filamento de la bombilla⁵ presentará una determinada resistencia, que podemos calcular: $R = \frac{V}{I} = \frac{2,25}{0,2} = 11,25 \Omega$
3. Si una resistencia de un valor conocido (por ejemplo $0,1 \Omega$) es atravesada por una corriente de 1 A (lo sabemos porque lo hemos medido), la tensión que cae en bornas de la misma no puede ser cualquiera: está determinada, y vale $V = I \cdot R = 1 \cdot 0,1 = 0,1 V$

Este es un punto básico en el que hay que detenerse si no se ha comprendido bien. Sólo tiene sentido avanzar si se haya perfectamente dominado.

2.4.2. Cálculo de potencias

La potencia permite cuantificar la realización de un cierto trabajo por unidad de tiempo. En circuito electrónico, la potencia se genera en forma de calor (es el caso de la un infiernillo eléctrico), movimiento (la onda de presión que produce un altavoz) o radiación (la antena de una emisora de radio, cómo la de un teléfono móvil, o la luz de una bombilla).

La potencia se puede calcular como el producto de la tensión por la corriente. Se mide en vatios.

$$P = I \cdot V \quad (2.6)$$

Ejemplo: La potencia disipada por la bombilla de la figura 2.2-B es de 0,45 W (450 mW).

Esta fórmula es válida sólo cuando el circuito es resistivo, y la potencia se disipa en forma de calor o de movimiento. No vale si la corriente y la tensión no están en fase (esto es, el circuito que se analiza no tiene un comportamiento resistivo). Asimismo, es aplicable sólo para tensiones y corrientes continuas ó eficaces. De nuevo veremos más adelante la aplicación para tensiones y corrientes alternas.

2.4.3. Ley de Kirchoff

La ley de Kirchoff se puede expresar en los siguientes términos: la suma de las corrientes que entran en un nudo es nula. Dicho de forma más sencilla: “la corriente que entra, sale”. Es algo tan intuitivo que lo aplicaremos casi sin darnos cuenta.

2.4.4. Exponenciales y logaritmos. Los decibelios

2.4.4.1. Los decibelios

Los decibelios no 'son' una cosa, sino que expresan una 'relación' entre magnitudes, esto es, cuantas veces algo es más grande que otra cosa.

⁵Este valor no coincide con el que podemos medir con un instrumento de medida cuando la bombilla está apagada, ya que al brillar, el filamento alcanza una temperatura muy alta, lo que eleva notablemente su resistencia. Los datos están tomados de un ejemplo real, en el que se ha medido una resistencia en frío de 1.3Ω .

Ejemplo: Una persona de 36 años es aproximadamente 5 dB más vieja que una persona de 12 años.

Una definición formal es:

$$X(\text{dB}) = 10 \log \left(\frac{A}{B} \right) \Rightarrow \frac{A}{B} = 10^{\frac{X}{10}} \quad (2.7)$$

El factor 10 es el que da el prefijo *deci* al *belio* (en honor de Bell).

Se representa por la expresión dB (minúscula y mayúscula). Cosas de la tradición con las que se debe ser cuidadoso, porque si se escribe de otra forma, queda feísimo.

2.4.4.2. ¿Porqué se miden cosas en decibelios?

Hay dos razones:

- Hay muchas magnitudes que se mueven entre valores muy dispares, de modo que es algo más cómodo decir que la ganancia de un amplificador operacional es de 109 dB que de⁶ 300.000 ó $3 \cdot 10^5$
- Los logaritmos convierten la multiplicaciones en sumas. Si yo tengo un amplificador de micrófono con tres etapas, la primera con una ganancia de 10 dB, la segunda y tercera con 20, la ganancia total es $G = 10 + 20 + 20 = 50$ dB.

2.4.4.3. Algunas relaciones básicas

Con las siguientes relaciones básicas, es posible convertir relaciones naturales de y a decibelios de forma mental:

- 1 = 0 dB
- 2 = 3 dB
- 5 = 7 dB
- 10 = 10 dB
- 100 = 20 dB

2.4.4.4. Complicaciones

No todo es tan sencillo: cuando se habla de magnitudes eléctricas, los decibelios se aplican siempre para relaciones de *potencias*. De modo que si medimos una relación entre potencias, aplicaremos la fórmula:

$$X(\text{dB}) = 10 \log \left(\frac{A}{B} \right) \Rightarrow \frac{A}{B} = 10^{\frac{X}{10}} \quad (2.8)$$

Pero si la relación es entre tensiones, aplicaremos:

⁶¿Error? No. Ver apartado 2.4.4.4.

$$X(dB) = 20 \log \left(\frac{A}{B} \right) \Rightarrow \frac{A}{B} = 10^{\frac{x}{20}} \quad (2.9)$$

Veamos dos ejemplos:

1. La potencia de radiofrecuencia se mide habitualmente en *dBm*. Se define esta unidad cómo la potencia de una señal referida⁷ a 1 mW. Una emisora en la que medimos 30 dBm, transmite una potencia de 1W.
2. Si un amplificador de tensión tiene una ganancia en tensión de 100 veces, significa que es capaz de multiplicar la potencia⁸ de una señal por 10.000 veces. La ganancia del mismo es de 40 dB.

2.4.5. Números complejos

No hay que asustarse al pensar que se tratan de números difíciles. Un número complejo es uno que tiene dos dimensiones (denominadas parte real e imaginaria) o si se prefiere, que tiene amplitud y fase (ver apartado 2.3.7).

Los números complejos son un artificio matemático para trabajar con dos parámetros al precio de uno, lo que ciertamente simplifica las cosas. Se utiliza para representar corrientes, tensiones que varían de forma sinusoidal o impedancias (ver apartado 2.5).

No nos preocupemos si no tenemos soltura en su manejo: no será imprescindible.

2.5. Impedancias

2.5.1. Concepto

Una *bobina* es un trozo de hilo conductor bobinado en espiral (ver figura 2.3). Respecto a la corriente continua es un trozo de hilo de baja resistividad. Sin embargo, cuando hacemos pasar por él una señal alterna, esta crea un campo magnético variable, tal y como se describe la Ley de Faraday. El campo magnético es proporcional a la frecuencia de la corriente. Este campo magnético induce a su vez una corriente sobre el hilo. Esta corriente tiene signo opuesto a la de que circula por la bobina, lo que se manifiesta en una cierta oposición a la de entrada, de modo que, cuanto más alta es la frecuencia de la señal, más dificultad presenta a su paso.

Un *condensador* es un componente formado por dos láminas separadas por un dieléctrico (aislante). Ver la figura 2.3. Frente a la corriente continua es un circuito abierto. Sin embargo, al conectar el condensador a una determinada tensión, las láminas se cargan dando lugar a un determinado campo electrostático. Si cambiamos la tensión, la carga se redistribuye, pero esta redistribución de carga produce una corriente eléctrica. Cuanto más rápida es la variación de la tensión, mayor es la corriente que circula. De este modo, si lo enfrentamos a un generador de corriente alterna, observamos paso de corriente. Tanto más cuanto mayor es la frecuencia.

En ambos casos, nos encontramos con un fenómeno similar al concepto de resistencia, pero distinto en cuanto que:

⁷Recordamos que los dB miden siempre RELACIONES y no magnitudes?

⁸Siendo formales, esto es así si las impedancias de entrada y salida son las mismas. Aun no siéndolo, la ganancia en potencia sería distinto, pero el principio enunciado es el mismo: la ganancia de tensiones se calcula con $20 \cdot \log$.

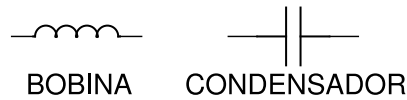


Figura 2.3: Bobina y condensador

1. Es dependiente de la frecuencia.
2. Provoca que la corriente y la tensión no estén en fase⁹: ante una tensión sinusoidal, los picos de corriente no corresponden con los picos de tensión, sino que unos y otros están desplazados 90 grados.

Ninguno de estos dos efectos tenían lugar con la resistencia, en la que el valor instantáneo de la corriente depende sólo del valor instantáneo de la tensión y de la resistencia, que es un valor constante. En una resistencia, tensión y corriente están siempre en fase.

2.5.2. Definición formal

La impedancia se representa habitualmente con la letra Z , y tiene dimensiones de Ohmio. En el caso más genérico, es un número complejo.

La *resistencia* es un caso particular de la impedancia, en la que esta toma un valor real.

$$Z_R = R \quad (2.10)$$

La *impedancia* de una bobina de inductancia L y de un condensador de capacidad C depende de la frecuencia (f) y se **define** como:

$$Z_L(f) = j \cdot 2\pi fL \quad (2.11)$$

$$Z_c(f) = \frac{1}{j \cdot 2\pi fC} \quad (2.12)$$

El parámetro ' j ' es la variable imaginaria. Tal vez el lector esté acostumbrado a referirse a ella como ' i ', pues es la forma tradicional que utilizan los matemáticos, pero en ingeniería se utiliza esta otra expresión y esta será la que usemos. Sin embargo, no nos preocupemos por el momento por el asunto de los números complejos, y trabajemos sólo con los módulos.

Un número complejo se puede representar como su módulo y su fase. El módulo de la impedancia indica cómo varía esta con la frecuencia, y es un número real. La fase indica la relación entre la fase de la corriente y la tensión, y en muchas ocasiones podemos obviarlo.

En resumen, quedémonos con el hecho de que el módulo de la impedancia de una bobina es proporcional a la frecuencia, y la de un condensador inversamente proporcional a la misma. Siendo formales:

$$|Z_L(f)| = 2\pi fL \quad (2.13)$$

⁹Se dice que dos señales sinusoidales están en fase si sus máximos (y mínimos) tienen lugar en el mismo instante de tiempo.

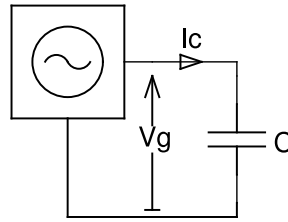


Figura 2.4: Corriente a través de un condensador

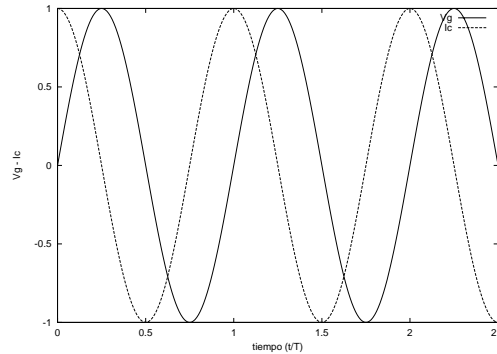


Figura 2.5: Corrientes y tensiones a distintas frecuencias

$$|Z_c(f)| = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.14)$$

Las leyes de Ohm tienen validez para impedancias, ya sea trabajando con su representación compleja o en módulos. Si trabajamos con números complejos, nos dan su amplitud y su fase, y si con módulos, sólo la amplitud.

Ejemplo: Conectamos un condensador a un generador sinusoidal (ver figura 2.4), la corriente resultante será:

$$I_c = \frac{V_G}{Z_C} = j \cdot 2\pi \cdot f \cdot C \cdot V_G \quad (2.15)$$

Este resultado debe ser interpretado en estos términos: la corriente será una senoide de la misma frecuencia del generador, cuyo

- Módulo es igual a $2\pi f C V_G$ (proporcional a la tensión del generador V_G , a la frecuencia f y la capacidad del condensador C).
- Fase es la del generador, retrasada 90 grados¹⁰

Es decir, que corriente y tensión son sinusoides desplazadas en el tiempo una respecto a la otra: veamos la figura 2.5, que representa las tensiones y corrientes de la figura 2.4 normalizadas¹¹.

En el apartado 2.6.6 veremos un ejemplo que aclarará los conceptos.

¹⁰Dejemos esta afirmación como está, aunque no ha sido justificada formalmente

¹¹Normalizadas, quiere decir que se considera que el valor de pico es la unidad. El resultado real será el de multiplicar la señal normalizada por el valor de pico real.

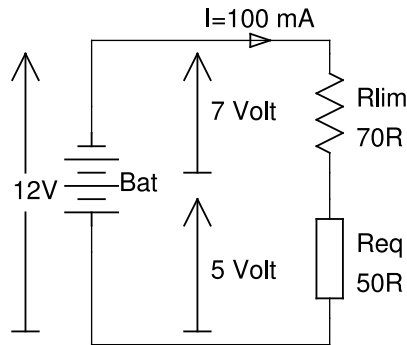


Figura 2.6: Regulador sencillo

2.6. Ejemplos

Los ejemplos que siguen deberían servir para comprobar la comprensión de algunos de los conceptos introducidos hasta el momento.

2.6.1. Fuente de alimentación de los trogloditas

Volvamos a la época en que los transistores eran de piedra y los dinosaurios poblaban la tierra.

Supongamos que tenemos un pequeño gramófono eléctrico que queremos usar en el troncomóvil para amenizarnos un largo viaje. Hemos pensado que podríamos usar la batería de 12 V del vehículo. Pero el manual del gramófono dice que éste se alimenta a 5 Voltios y que consume 100 mA. ¿Algo podemos hacer?.

Una primera respuesta sería la de reducir la tensión mediante el uso de una resistencia serie (R_{lim}), tal y como se muestra en la figura 2.6. El magnetófono se comporta igual que una resistencia¹² de 50 Ω (una caída de 5 Volt con un consumo de 0,1 A son 50 Ω , ¿no es cierto?). En la resistencia serie deben caer 12-5=7 Volt. Para una corriente de 100 mA, esto corresponde a una resistencia de 70 Ω .

El artefacto que hemos construido se denomina regulador, pero tiene unas prestaciones muy malas, porque sólo da a la salida la tensión deseada si la carga es la estipulada. Variaciones de la misma, darán variaciones de la tensión de salida. Bien pudiera suceder que el gramófono saliera mal parado del experimento, y de seguro que la calidad del sonido no sería buena.

Más adelante construiremos una fuente de alimentación (capítulo 3 y 4) que no tiene este problema.

2.6.2. Resistencia de limitación de un LED

Un LED es un dispositivo que ha sido construido para emitir luz. Eléctricamente se comporta como un diodo. En el apartado 3.4.2.3 lo analizaremos con más precisión. Ya que muchos aparatos electrónicos los usan, su aspecto será familiar para muchos.

Observemos la figura 2.7. Tenemos una fuente de tensión de 12 Voltios (por ejemplo una batería de plomo como las que se usan en coches o motocicletas). Queremos calcular el

¹²Se dice que su *resistencia equivalente* es de 50 Ω

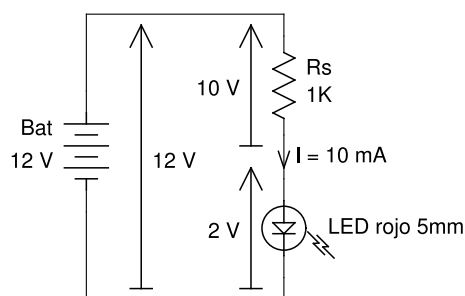


Figura 2.7: LED con una resistencia serie de limitación

valor de la resistencia serie que se necesita. Un LED rojo necesita una tensión en bornas de aproximadamente 2 Voltios, bastante constante al variar la corriente que lo atraviesa. Podríamos decir que cuando está alimentado se comporta como una pequeña pila, pero a diferencia de aquella, la diferencia de potencial desaparece al retirar la corriente que pasa a través de él. Por otro lado, cuando lo atravesamos con una corriente de 10 mA, se logra una iluminación más que notable. Con 20 mA luciría más, pero 10 mA está muy bien.

Vamos a calcular el valor de la resistencia serie R_s que necesitamos.

Los 12 Voltios de la fuente se reparten entre el LED y la resistencia. Como ya hemos dicho que en el LED caen aproximadamente 2 Volt, el resto es para la resistencia: 10 Voltios.

La corriente que pasa por el diodo LED es la misma que pasa por la resistencia (Ley de Kirchoff). Para que con una corriente de 10 mA la caída en la resistencia sea de 10 Volt, esta debe tener un valor de 1 K Ω .

2.6.3. Potencia disipada en una resistencia

En el ejemplo del apartado 2.6.1, hemos de calcular la potencia disipada en la resistencia, ya que esta potencia es calor, y si usamos un componente demasiado pequeño, éste se calentará excesivamente y terminará quemándose y tal vez produciendo quemaduras al incauto aficionado.

Cómo hemos visto en la ecuación 2.6, la potencia disipada (en forma de calor) en R_{lim} es $P = I \cdot V$, y por tanto 0,7 W. Es una potencia no despreciable, y deberíamos usar un componente voluminoso, especificado al menos para 2 W, capaz de disipar todo este calor sin subir demasiado su temperatura.

2.6.4. Componentes en serie y paralelo

En la figura 2.8 se muestra la equivalencia circuitos de impedancias en serie y paralelo. Demostremos formalmente la equivalencia del circuito en paralelo, y dejemos para el lector la demostración del circuito serie, mucho más simple.

La tensión en bornas de Z_1 y Z_2 es la misma, que llamaremos V_{eq} . La corriente que circula por el conjunto I_{eq} , será igual a la suma de la que pasa por Z_1 y Z_2 .

$$Z_{eq} = \frac{V_{eq}}{I_{eq}} = \frac{V_{eq}}{I_{Z1} + I_{Z2}} = \frac{V_{eq}}{\frac{V_{eq}}{Z1} + \frac{V_{eq}}{Z2}} = \frac{1}{\frac{1}{Z1} + \frac{1}{Z2}} \quad (2.16)$$

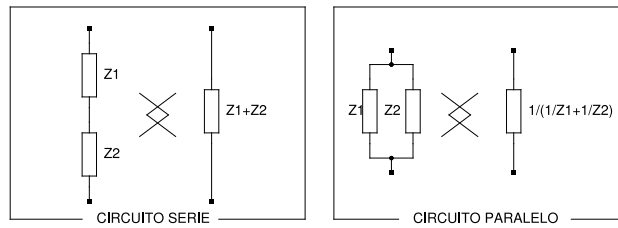


Figura 2.8: Circuitos de impedancias serie y paralelo

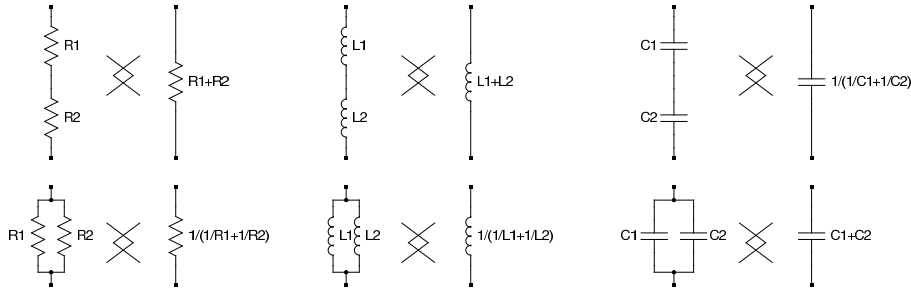


Figura 2.9: Circuitos R, L y C en serie y paralelo

Esta fórmula también puede escribirse como:

$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \tag{2.17}$$

Si quisiéramos ver cómo queda esta equivalencia para circuitos de resistencias, bobinas o condensadores, bastaría aplicar las ecuaciones ya vistas. El resultado se resume gráficamente en la figura 2.9.

2.6.5. Divisor resistivo

El circuito de la figura 2.10 se denomina *divisor resistivo*. Es un circuito muy interesante.

Toda la corriente que atraviesa R_1 lo hace también por R_2 toda vez que la corriente de salida (I_o) es nula.

Resulta pues que:

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{R_1 + R_2} \tag{2.18}$$

Por tanto:

$$V_o = I_{in} \cdot R_1 = V_{in} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \tag{2.19}$$

Es muy conveniente escribir fracciones en las que numerador y denominador tienen las mismas unidades. Ayuda a entender el significado de las ecuaciones y detectar posibles errores.

La relación entre entradas y salidas es:

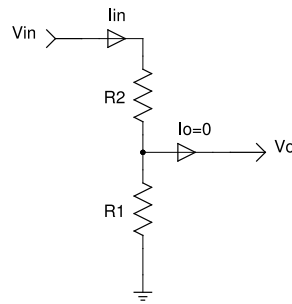


Figura 2.10: Divisor resistivo

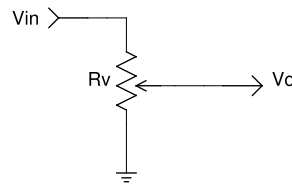


Figura 2.11: Ejemplo de uso divisor resistivo: control de nivel

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{R1}{R1 + R2} \quad (2.20)$$

La tensión de salida es proporcional a la de entrada a través de un factor constante, que no depende del valor absoluto de las resistencias sino de la relación de valores entre las mismas:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1 + \frac{R2}{R1}} \quad (2.21)$$

Además la tensión de salida variará entre cero (cuando $R1=0$) y la tensión de entrada (cuando $R2=0$). Por esta razón se llama *divisor de tensión*.

El divisor de tensión se utiliza con profusión, por lo que es muy deseable memorizar la fórmula de la relación entrada a salida (ecuación 2.20).

En la figura 2.11 vemos un ejemplo de uso del divisor de tensión en un control de volumen de un amplificador. En ella se muestra un componente que se denomina *potenciómetro*, que está hecho con un material resistivo y tiene un cursor deslizante que se puede conectar a un punto intermedio de la resistencia. Siguiendo el esquema de la figura 2.10, $R1 + R2$ es constante. Si el cursor está en el extremo inferior, $R1$ tendrá un valor pequeño y $R2$ grande, y la señal de salida estará muy atenuada. Si es en el extremo superior, $R2$ es grande y $R1$ pequeño, y el nivel de la señal resultante será grande.

Intuitivamente, podemos ver que, si la diferencia de potencial en la entrada es como una altura, esta se reparte de forma escalonada a través de la resistencia R_v . Cuanto mayor sea la parte de resistencia seleccionada, mayor será la diferencia de potencial (respecto a masa) que tendremos a la salida.

2.6.6. Filtro paso bajo

Consideremos el circuito de la figura 2.12. En ella vemos un circuito similar al divisor resistivo de la figura 2.10, sólo que la resistencia $R1$ ha sido sustituida por un condensador. Intuitivamente podemos adivinar que, como la impedancia del condensador

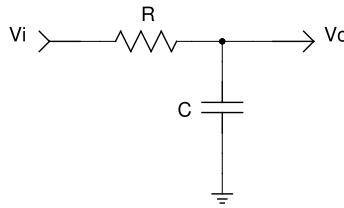


Figura 2.12: Filtro paso bajo

disminuye con la frecuencia, el circuito va a atenuar las altas frecuencias más que las bajas. Vamos a ver de qué manera.

Para ello, vamos a desplegar nuestras ecuaciones recién estrenadas del divisor de tensión (fórmula 2.20).

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{1}{j2\pi fC}}{\frac{1}{j2\pi fC} + R} = \frac{1}{1 + j2\pi fRC} \quad (2.22)$$

Si llamamos f_c , *frecuencia de corte* a

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.23)$$

resulta una expresión muy sencilla:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 + j\left(\frac{f}{f_c}\right)} \quad (2.24)$$

Quienes no tengan soltura con los complejos pueden usar las siguientes ecuaciones.

$$\text{mod}\left(\frac{V_o}{V_i}\right) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}} \quad (2.25)$$

$$\text{fase}\left(\frac{V_o}{V_i}\right) = -\arctan\left(\frac{f}{f_c}\right) \quad (2.26)$$

Pero en realidad ni siquiera estas ecuaciones necesitaremos. Si representamos gráficamente la amplitud y la fase resultante, su resultado se muestra en la figura 2.13. En ellas se muestra la frecuencia en escala logarítmica, la amplitud en decibelios y la fase de forma lineal. Hay que reconocer que con estos trucos, resultan unas figuras muy bonitas.

Simplificando un poco, podemos decir que por debajo de la frecuencia de corte la amplitud de la señal queda prácticamente inalterada. Para frecuencias por encima de la de corte, la amplitud disminuye a ritmo de 20 dB por *década*¹³. Dicho de otro modo, al multiplicar por diez la frecuencia, la amplitud disminuye a la décima parte. Simplificando la ecuación 2.25, podemos decir:

$$\text{mod}\left(\frac{V_o}{V_i}\right)_{f < f_c} \sim 1$$

¹³Década significa un salto de diez veces en frecuencia. Es muy común también el término *octava*, usado por los músicos, que se refiere a un salto del doble de frecuencia.

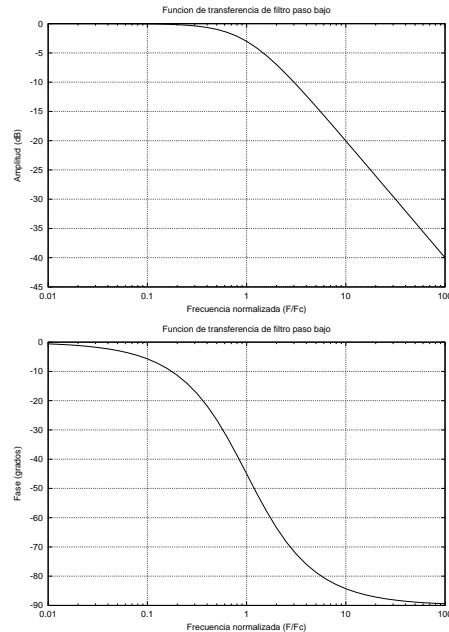


Figura 2.13: Función de transferencia de amplitud y fase de un filtro paso bajo

$$\text{mod} \left(\frac{V_o}{V_i} \right)_{f > f_c} \sim \frac{f_c}{f}$$

Respecto a la fase, podemos decir que a la frecuencia de corte tenemos un desfase de 45 grados, y que este alcanza cifras cercanas a los 90 grados de retardo una década por encima.

La variación de la amplitud y la fase es simultánea. En resumen:

- A baja frecuencia (bien por debajo de la frecuencia de corte) el filtro deja pasar las señales sin alterarlas.
- A frecuencias medias (en el entorno de la frecuencia de corte), la atenuación es de 3 dB (0,7 veces la amplitud) y la salida está retardada unos 45 grados respecto a la entrada.
- A frecuencias altas (bien por encima de la frecuencia de corte), el filtro atenúa progresivamente las señales al aumentar la frecuencia de las mismas. El desfase entre entrada y salida es aproximadamente constante e igual a 90 grados.

Por ello, el filtro recibe el nombre de *paso bajo*, pues deja pasar las bajas frecuencias inalteradas, atenuado las altas.

Cuando hablamos de circuitos de audio, suele ser mucho más importante la respuesta en amplitud que en fase, ya que el oído humano es poco sensible a la variación de la fase. Sin embargo, en otras aplicaciones, la respuesta en fase puede ser vital (por ejemplo, cuando estudiemos la realimentación en el capítulo 8).

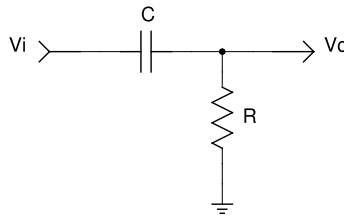


Figura 2.14: Esquema de un filtro paso alto

Una aplicación (entre miles) de un filtro paso bajo la encontramos en los circuitos reproductores de cintas de cassette. Las cintas de hierro requieren un filtro paso bajo con una constante de tiempo (τ) de $120 \mu s$, para compensar el realce introducido en la grabación.

$$\tau = RC \Rightarrow f_c = 1,3 \text{ kHz}$$

Este esquema permite reducir el efecto del ruido de alta frecuencia de las cintas, a base de reforzar frecuencias altas en grabación y reducirlo en reproducción.

2.6.7. Filtro paso alto

En la figura 2.14 se muestra el esquema de un filtro *paso alto*. Es muy similar al filtro *paso bajo*, pero se han rotado los componentes. Intuitivamente podemos adivinar que, como la impedancia del condensador es muy alta a baja frecuencia, el circuito va a atenuar las bajas frecuencias, pero va a dejar pasar inalteradas las altas, cuando la impedancia del condensador sea mucho más alta que la de la resistencia. Por ello, el filtro recibe el nombre de *paso alto*.

Una vez más, trazamos las ecuaciones ya conocidas:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{\frac{1}{j2\pi fC} + R} = \frac{j2\pi fRC}{1 + j2\pi fRC} \quad (2.27)$$

Manteniendo la anterior definición (eq 2.23) para la f_c , la *frecuencia de corte*, resulta

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{j\left(\frac{f}{f_c}\right)}{1 + j\left(\frac{f}{f_c}\right)} \quad (2.28)$$

$$\text{mod}\left(\frac{V_o}{V_i}\right) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}} \quad (2.29)$$

$$\text{fase}\left(\frac{V_o}{V_i}\right) = -\arctan\left(\frac{f_c}{f}\right) \quad (2.30)$$

Si representamos gráficamente la amplitud y la fase resultante, su resultado se muestra en las gráficas de la figura 2.15. Una vez más, se muestra la frecuencia en escala logarítmica, la amplitud en decibelios y la fase de forma lineal: es el modo más habitual de hacerlo.

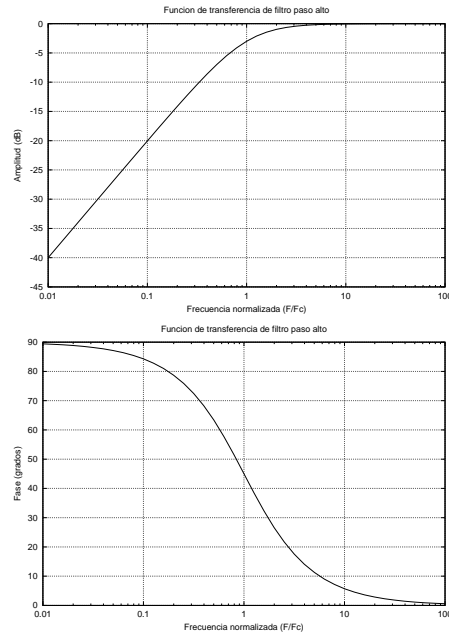


Figura 2.15: Función de transferencia de amplitud y fase de un filtro paso alto

Simplificando un poco, podemos decir que por encima de la frecuencia de corte la amplitud de la señal queda inalterada. Para frecuencias por debajo de la de corte, la amplitud disminuye a razón de 20 dB por década.

Respecto a la fase, podemos decir que a la frecuencia de corte tenemos un desfase de 45 grados, y que este alcanza cifras cercanas a los 90 grados de retardo una década por debajo.

2.7. El diseño

2.7.1. Errores admisibles

Si le preguntamos que es el número π a un físico, un matemático y un ingeniero responderán:

- el físico dirá que π es $3,141592 \pm 0,5 \cdot 10^{-6}$
- el matemático responderá que es la relación entre el diámetro de una circunferencia y su longitud
- un ingeniero dirá que es, aproximadamente, 3

Un error del 10% suele ser aceptable en términos ingenieriles. Pero cuidado, no lo apliquemos indiscriminadamente so pena de cometer errores superiores al 10% (ver apartado 4.5).

Ejemplo: Al estudiar el divisor de tensión visto en el capítulo 2.6.5, hemos partido de la hipótesis de que la corriente de salida es nula. Esto no sucederá nunca, excepto cuando no conectamos nada a la salida, con lo que el circuito es inservible. ¿En que condiciones podemos asumir que las fórmulas son correctas?. Pues cuando la corriente de salida I_{out} es diez veces inferior a la de entrada I_{in} .

2.8. Introducción a los componentes electrónicos

2.8.1. Introducción

Es normal hacer una descripción detallada de los tipos de componentes antes de entrar en otras cuestiones. Sin embargo, el autor ha preferido usar otra estrategia. Iremos viendo circuitos y a partir de ellos, describiremos los componentes. De otro modo corremos el riesgo de los antiguos montañeros que escalaban el Himalaya: llevar todos los materiales al punto de inicio del ascenso agotaba tanto que la escalada se hacía ya en malas condiciones.

2.8.2. Componentes básicos

Hay tantos componentes electrónicos que muy poca gente puede presumir de conocerlos todos con detalle.

En este capítulo sólo se pretende hacer una somera enumeración y descripción de algunos de aquellos con los que tendremos un cierto grado de relación. Más adelante ampliaremos detalles de alguno de ellos.

Los *componentes pasivos* son aquellos que no son capaces de amplificar la señal eléctrica, por lo que se dice que tienen un comportamiento *pasivo*. Es una definición algo vaga, pero existe bastante uniformidad de criterio sobre cuales son activos y pasivos.

Los componentes electrónicos pasivos más importantes son:

- Resistencias
- Condensadores
- Inductancias
- Diodos
- Transformadores

Existen muchos otros: fusibles, relés, etc, pero no vamos a estudiarlos en este punto.

Los *componentes activos* son aquellos capaces de amplificar una señal: transistores, circuitos integrados, lámparas termoiónicas, etc.

2.8.3. Identificación de los componentes

Es necesario aprender a identificar los componentes y a leer el valor de los mismos. El primero de los dos aspectos requiere el uso de fotografías que se incluyen en capítulos posteriores.

Sin embargo, conviene comentar que en los últimos diez años se ha introducido una nueva tendencia en la electrónica, la denominada tecnología de *Montaje Superficial*¹⁴. Antes, los componentes tenían terminales que se introducían en unos agujeros presentes en el circuito impreso en el que se soldaban. La tecnología de Montaje Superficial surgió para permitir mayores densidades de componentes, y hace innecesarios los taladros en los circuitos impresos. Al menos los taladros de sujección de los componentes.

¹⁴Denominados SMD, *Surface Mount Devices*

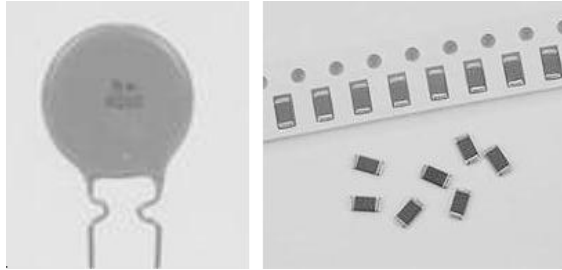


Figura 2.16: Componentes en montaje convencional y SMD

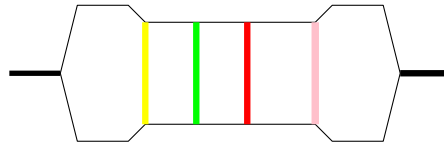


Figura 2.17: Resistencia genérica (código de colores)

Aunque resulte obvio, no debemos olvidar que, por regla general, todo componente, cuanto más pequeño es, menos potencia puede disipar para un determinado aumento de temperatura, por lo que los componentes SMD tiene más dificultad para disipar calor que los normales. Algunos componentes SMD -como los condensadores cerámicos- tienen intrínsecamente mejores prestaciones que los de montaje convencional. Otros no se fabrican en SMD (condensadores plásticos). En cualquier caso, el montaje SMD es siempre más complejo que el convencional, muy especialmente para los aficionados.

Los componentes convencionales y de montaje superficial, pueden tener aspectos físicos y parámetros muy diferentes. Asimismo se pueden identificar de forma muy dispar.

Dicho todo esto, de ahora en adelante, *nos centraremos en los componentes de montaje convencional*, que son mucho más fáciles de soldar y de conseguir en las tiendas de electrónica.

2.8.4. El valor de un componente: el código de colores

Para indentificar el valor de un componente se ha usado muy habitualmente un código de colores, de modo que sucesivas bandas de color indican los dígitos y el multiplicador que indican el valor del componente. Este código se usa, casi sin excepción, solamente para las resistencias de montaje convencional. Veamos la figura 2.17. En ella vemos una resistencia que tiene cuatro bandas de color, tres equiespaciadas, y una cuarta algo más separada. Esta, que permanece más separada, dejémosla para el final. Las dos primeras bandas indican el valor y el tercero el multiplicador.

Ejemplo: Si la resistencia tiene las bandas que corresponden al 1, 2 y 3, su valor es $R=12 \cdot 10^3$, 12 k Ω .

La tabla de colores es:

Dígito	Color
0	Negro
1	Marrón
2	Rojo
3	Naranja
4	Amarillo
5	Verde
6	Azul
7	Violeta
8	Gris
9	Blanco

A estos se añaden dos usados como multiplicadores especiales:

Color	Multiplicador
Oro	0.1
Plata	0.01

La *tolerancia* de la resistencia se marca con la última banda de color, normalmente más gruesa o más separada del resto. La *tolerancia* indica la posible desviación que podemos encontrar en el valor del componente. Por ejemplo, una resistencia de 1 k Ω y un $\pm 1\%$ de tolerancia puede tener un valor de resistencia comprendido entre 990 y 1010 Ω .

Tol	Color
$\pm 10\%$	Plata
$\pm 5\%$	Oro
$\pm 2\%$	Rojo
$\pm 1\%$	Marrón

Según la propia tolerancia de los componentes, el número de bandas de color puede ser mayor o menor¹⁵. Ver apartado 2.8.5.

Al coger una resistencia, lo primero es indentificar la banda de la tolerancia, que debemos poner a la derecha. A partir de este momento, leeremos los colores que nos indicarán, del primero al penúltimo el valor y el último, el factor multiplicativo.

Ejemplo: Una resistencia con los colores marrón, negro, negro, rojo, rojo (tol) es de $100 \cdot 10^2 = 10 \text{ K}\Omega \pm 2\%$.

El código de colores es muy útil, pero tiene el problema de que a veces es difícil distinguir los colores. Marrón y naranja tienden a confundirse, y se hace necesario la ayuda de un polímetro para discernir la duda.

En los componentes de montaje superficial, si el tamaño lo permite, se escriben estos dígitos en el cuerpo de la resistencia o condensador. Si no cabe, no se escribe, y se hacen necesario instrumentos externos para averiguar un valor. Normalmente no es una limitación, pues el tamaño hace que difícilmente puedan estar fuera de su embalaje, habitualmente rollos de papel (ver figura 2.16).

Los *condensadores* modernos tienen indicado con números el valor en el cuerpo del componente, y otras veces se usa una descripción como la anterior, pero referenciada en

¹⁵Cuando un componente tiene una precisión muy grosera, de poco sirve fabricarlo en valores muy cercanos. Cuanto mayor es la precisión, mayor sentido tiene fabricar componentes de valores próximos.

pF ó nF, según el tipo. Por ejemplo un condensador con la indicación de 104 puede valer 100 nF. O tal vez 100 pF. Normalmente el tamaño y tipo resuelven la duda. El marcado de los condensadores siempre han sido muy caótico. La tolerancia de los condensadores de plástico se hace habitualmente por una letra, según la tabla que sigue:

Código	Tolerancia
F	1 %
G	2 %
H	2.5 %
J	5 %
K	10 %
M	20 %

Los *diodos y transistores* suelen tener escrito en el cuerpo identificación de fabricante y tipo. Cuando son SMD se usan abreviaturas que cambian de fabricante a fabricante, lo que suele ser muy difícil la identificación.

Los *circuitos integrados*, normalmente de mayor tamaño, suelen tener escritas en el cuerpo las identificaciones de fabricante y tipo.

2.8.5. Valores disponibles

Si un componente tiene un valor nominal de 1.0 y una tolerancia del 10%, puede llegar a valer entre 0,9 y 1,1. Lo razonable sería fabricar el siguiente valor a 1,2, y no 1,1, ya que los valores se solaparían con los anteriores. Dependiendo de la tolerancia de un componente, se fabrica en *series* diferentes: una serie de 12 valores por década para componentes del 10%, una serie de 24 para el 5%. Estas series se denominan series E y son:

Serie E12: 10, 12, 15, 18, 22, 27, 33, 39, 47, 56, 68, 82

Serie E24: 10, 11, 12, 13, 15, 16, 18, 20, 22, 24, 27, 30, 33, 36, 39, 43, 47, 51, 56, 62, 68, 75, 82, 91

El aficionado debe intentar trabajar con las series E12 para los condensadores y la E24 para las resistencias. Es muy común usar resistencias del 1% o 2% pero usando sólo los componentes de la serie E24. Tengamos en cuenta que para la serie E24, entre 10 Ω y 1 M Ω hay ¡120 valores distintos!.

Esto quiere decir que si de nuestros cálculos se obtiene un valor de 4123 Ω , deberemos usar una resistencia de 4k3, salvo que la aplicación exija una precisión grande en cuyo caso, deberemos usar resistencias de mayor precisión, y hacer uso de una serie superior u obtener el valor deseado mediante combinaciones serie/paralelo.

2.8.6. Cómo medir o caracterizar un componente

Para medir un componente hace falta instrumental específico. El aparato más básico y versátil es el *polímetro*, un instrumento capaz de hacer medidas de varios parámetros: corrientes, tensiones continuas y alternas y resistencias, entre otras. Existen polímetros analógicos (de aguja) y digitales (números).

Los polímetros digitales son capaces de medir con buena precisión resistencias desde decenas de Ohmios a Mega Ohmios. Fuera de este rango, un polímetro normal no ofrece mucha precisión.

Algunos permiten medidas de capacidades e inductancias, con rangos y precisiones variables según el tipo de instrumento.

Existen instrumentos lejos del alcance del aficionado que permiten medidas muy precisas de ciertos parámetros de ciertos componentes. En otras ocasiones, el propio aficionado puede construir algunos aparatos para realizar medidas que pueden ser muy precisas de algunos parámetros (capacímetros, medidores de ganancia de transistores, grip-dip, medidores de cortos, medidores de temperatura, comparación de resistencias de elevada precisión, etc).

2.8.7. Información: las hojas de características

Los componentes electrónicos no se venden con manual de instrucciones. El método clásico de conocer la información detallada de un componente es mediante lo que se ha denominado la *hoja de características*, o *data sheet* del inglés. Excepto para resistencias y condensadores (en los que suele haber descripciones por familias), suele existir una hoja que describe en detalle las características de un dispositivo, escrita por el fabricante.

La generalización del uso de Internet ha facilitado enormemente el acceso a las hojas de características. Suele bastar un buen buscador para localizar en cuestión de segundos las hojas de un dispositivo, normalmente en formato PDF que podemos leer con el Acrobat Reader u otros programas que se distribuyen gratuitamente.

No esperemos encontrar hojas de características en idiomas distintos del inglés. Es un hecho que puede gustar o no, pero es la realidad más contundente.

2.8.8. Símbolos

Veamos la figura 2.18. En ella podemos ver algunos símbolos comunes. Como el caso de la resistencia que se ha mostrado, se pueden usar distintos símbolos para un componente.

2.9. Resumen del capítulo

A continuación, resumimos algunos de los conceptos más importantes del capítulo:

- La ley de Ohm expresa la relación entre tensión, corriente e impedancia de un circuito: $I = \frac{V}{Z}$
 - La corriente es una magnitud que *atraviesa* un circuito.
 - La tensión es una diferencia que hay entre dos puntos de un circuito.
 - La resistencia es una magnitud intrínseca a un circuito.
- Las impedancia de una resistencia, bobina y condensador son:

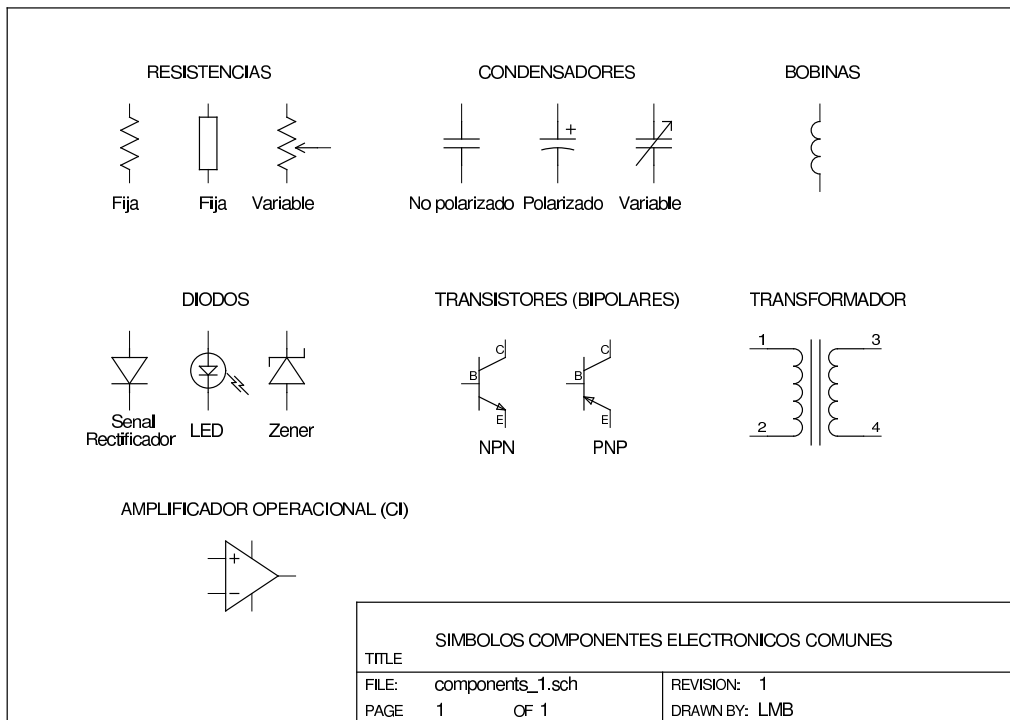


Figura 2.18: Símbolos de componentes electrónicos comunes

$$Z_R = R$$

$$Z_L = j \cdot 2\pi fL$$

$$Z_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

- Una resistencia atravesada por una corriente disipa calor. La potencia disipada es:
 $P = I^2 \cdot R$
- Los decibelios miden relación entre magnitudes de un circuito:

$$R(dB) = 10 \cdot \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

$$R(dB) = 20 \cdot \log \left(\frac{V_1}{V_2} \right)$$

- Un error de un 10% suele ser aceptable en términos ingenieriles
- La función de transferencia de un divisor resistivo como el de la figura 2.10 es:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{R1}{R1 + R2}$$

- La función de transferencia en amplitud de un filtro paso bajo RC es $\left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{1+(f/f_c)^2}}$ donde $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$ se denomina *frecuencia de corte*. Si simplificamos, podemos decir que señales cuya frecuencia está por debajo de f_c , pasan sin atenuación, y por encima, se atenúan a razón de 20 dB por década.
- La tolerancia de un componente indica qué variación puede sufrir del valor nominal del mismo, debido a tolerancias de fabricación. A esta debería sumarse variaciones en temperatura y otras de segundo orden.

