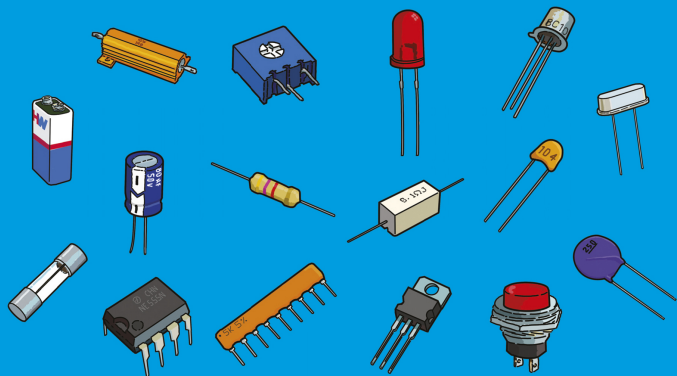


Paolo Aliverti

Electrónica trucos y secretos

130 ideas para resolver cualquier problema



- Resistores y condensadores, motores, relés, altavoces y micrófonos
- Amplificadores operacionales
- Nociones básicas: corriente, tensión, resistencia e impedancia
- Diodos, transistores y semiconductores

Paolo Aliverti

Electrónica. Trucos y secretos

Аннотация

Un maker es un artesano digital, un apasionado que utiliza instrumentos nuevos para transformar sus ideas en proyectos concretos. La colección Made For Makers reúne la experiencia de makers expertos que comparten sus conocimientos para ayudar a otros makers a llevar a cabo el maravilloso viaje hacia el redescubrimiento del fabricar.

Un nuevo público de makers y entusiastas está redescubriendo el placer por construir y reparar circuitos electrónicos: una tarea no siempre fácil, que requiere competencia, experiencia e intuición.

Tras el éxito de Electrónica para makers, Paolo Aliverti presenta en este libro sus trucos y secretos para aprender nuevas técnicas y resolver los problemas comunes de todo diseñador. Los trucos están pensados para ser aplicados eficazmente, comprenden tanto la teoría como los desarrollos prácticos para obtener circuitos funcionales.

Este es un manual imprescindible para todos los apasionados de la electrónica, desde el usuario principiante hasta el avanzado, pues incluye explicaciones claras paso a paso y multitud de ilustraciones.

Algunos temas tratados

– Nociones básicas: corriente, tensión, resistencia e impedancia, resolución de circuitos en corriente continua y alterna.

– Componentes pasivos: resistores, condensadores y bobinas, motores, relés, altavoces y micrófonos.

– Diodos, transistores y semiconductores: funcionamiento de la unión PN y de diodos, transistores bipolares, FET y MOSFET para el tratamiento de señales, TRIAC y SCR para el control de potencias elevadas.

– Amplificadores operacionales: control de un relé, trigger de Schmitt, osciladores de onda cuadrada y sinusoidal.

Sobre el autor

Paolo Aliverti. Ingeniero de telecomunicaciones, artesano digital y escritor. Es autor de los best seller El manual de Arduino, Electrónica para makers y Reparar (casi) cualquier cosa (Editorial Marcombo), Il manuale del maker (Edizioni FAG, tr. ingl. The Maker's Manual, Maker Media Press) y Stampa 3D – Stazione futuro (Hoepli). Organiza cursos y talleres sobre la fabricación digital, es fundador de Frankenstein Garage y FabLab Milano, y ha creado un laboratorio de reparaciones electrónicas industriales, www.reelco.it. Su sitio web es www.zeppelinmaker.it.

Содержание

Índice	11
Introducción	18
El canal de video	20
Mi equipo	23
Estructura del libro	24
Quién soy	25
Advertencias	27
1	28
Corriente eléctrica	30
Tensión	36
Ley de Ohm	39
Conexiones en serie y en paralelo	43
Conexión en estrella y en triángulo	48
Generadores	51
La metáfora acuática	56
Potencia	59
Leyes de Kirchhoff	63
Teoremas de Thevenin y Norton	75
Funciones matemáticas y sinusoidales	80
Tiempos y frecuencias	85
Fasores	87
Operaciones sobre fasores	95
Producto de un fasor por una constante	96

Suma de fasores	97
Derivada de un fasor	98
Ley de Ohm en corriente alterna	102
Condensadores en corriente alterna	104
Inductores en corriente alterna	110
Impedancia	115
Potencia en los circuitos en corriente alterna	119
Decibelios	122
Конец ознакомительного фрагмента.	124

Electrónica trucos y secretos

130 ideas para resolver cualquier problema

Acceda a www.marcombo.info
para descargar gratis
contenido adicional
complemento imprescindible de este libro

Código:

ARDUINO9

ectrón

Edición original publicada en italiano por Edizioni LSWR
con el título: *Elettronica trucchi e segreti | 130 idee per risolvere
ogni problema* © Paolo Aliverti 2020.

Título de la edición en español:

*Electrónica: trucos y secretos | 130 ideas para resolver
cualquier problema*

Primera edición en español, año 2021

© 2021 MARCOMBO, S. L.

www.marcombo.com

Traducción: Sònia Llena

Correctora: Beatriz García

Directora de producción: M.^a Rosa Castillo

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley.

Esta publicación contiene opiniones del autor y tiene por objeto proporcionar información clara y precisa. El procesamiento de textos, incluso si se realiza con una atención escrupulosa, no puede asumir la responsabilidad específica del autor y/o editor de los posibles errores o imprecisiones.

El editor ha hecho todo lo posible para obtener y citar las fuentes exactas de las ilustraciones. Si en algunos casos no ha sido posible encontrar alguna con derechos de autor, está disponible para hacer frente a las omisiones involuntarias o los errores en las referencias citadas.

ISBN: 978-84-267-3273-6

Producción del ePub: booqlab

Índice

INTRODUCCIÓN

El canal de video

Estructura del libro

Quién soy

Advertencias

1. NOCIONES BÁSICAS

Corriente eléctrica

Tensión

Ley de Ohm

Conexiones en serie y en paralelo

Generadores

La metáfora acuática

Potencia

Leyes de Kirchhoff

Teoremas de Thevenin y Norton

Funciones matemáticas y sinusoidales

Tiempos y frecuencias

Fasores

Operaciones sobre fasores

Ley de Ohm en corriente alterna

Condensadores en corriente alterna

Inductores en corriente alterna

Impedancia

Potencia en los circuitos en corriente alterna

Decibelios

2. COMPONENTES PASIVOS

1. Leer el valor de una resistencia

2. Leer el valor de una resistencia de montaje superficial

(SMD)

3. Medir una resistencia

4. Conectar resistencia en serie y en paralelo

5. Calcular la resistencia equivalente de cualquier red

6. Calcular la resistencia equivalente de una red en estrella (o en triángulo)

7. Conectar baterías en serie o en paralelo

8. Elegir un alimentador

9. Resolver un circuito electrónico simple

10. Adaptar un divisor de tensión

11. Adaptar un divisor de corriente

12. Calcular la resistencia para encender un led a 12 V

13. Utilizar un generador real

14. Adaptar la potencia para una resistencia

15. Resolver una red compleja con Kirchhoff

16. Resolver un circuito con Thevenin

17. Reconocer un condensador y leer su valor

18. Combinar varios condensadores

19. Reconocer un inductor y leer su valor

20. Combinar varios inductores

21. Calcular el tiempo de carga de un condensador

- 22. Calcular el tiempo de carga de un inductor
- 23. Calcular la reactancia de un condensador
- 24. Calcular la reactancia de un inductor
- 25. Resolver circuitos con impedancias genéricas
- 26. Impedancias en serie
- 27. Impedancias en paralelo
- 28. Divisor capacitivo
- 29. Encender un led a 230 V
- 30. Calcular correctamente la potencia en un circuito genérico
- 31. Cómo funciona un transformador
- 32. Combinar los devanados de un transformador
- 33. Pulsadores, interruptores y cruzamientos
- 34. Desviar la corriente de una parte a otra
- 35. Luz con doble cruzamiento
- 36. Elegir o utilizar un relé
- 37. Relés con retención de posición
- 38. Flash con relé
- 39. Motores
- 40. Controlar un motor con un cruzamiento
- 41. Controlar el movimiento de un motor con un relé
- 42. Añadir un final de carrera a un motor
- 43. Micrófonos
- 44. Altavoces, zumbadores y sensores piezoeléctricos
- 45. Varistores
- 46. Fusibles
- 3. DIODOS, TRANSISTORES, SEMICONDUCTORES

47. ¿Cómo funciona un diodo?
48. Elegir un diodo
49. Utilizar un diodo
50. Utilizar un diodo zener
51. Probar un diodo
52. Cómo funciona un puente de diodos
53. Proteger las entradas de alimentación
54. Proteger las entradas digitales con diodos
55. Encender un led
56. Puertas lógicas con diodos
57. El transistor bipolar
58. Elegir un transistor bipolar
59. Comprobar un transistor
60. Utilizar un transistor como conmutador
61. Tipos de etapas con transistor y su polarización
62. Polarizar un amplificador con emisor común con características gráficas
63. Obtener el equivalente de Thevenin del circuito de entrada de un amplificador con emisor común
64. Planificación empírica para un amplificador con emisor común
65. Amplificador de colector común
66. Amplificador diferencial
67. Amplificador push-pull
68. Conectar varias etapas en los amplificadores de transistor
69. Relé controlado por luz (o por temperatura)

70. Led fotosensible con apagado gradual

71. Intermitente con transistor

72. Luz de batería baja con transistor

73. El transistor JFET

74. Elegir un JFET

75. Utilizar un JFET como amplificador

76. Autopolarizar un JFET (*self biasing*)

77. Resolver un circuito con JFET con fórmulas

78. Circuito de prueba sencillo para un JFET de canal N

79. Método empírico para un amplificador JFET de fuente

común

80. El transistor MOSFET

81. Elegir un MOSFET

82. Comprobar MOSFET y JFET

83. Utilizar un MOSFET de enriquecimiento de canal N

84. Usar un MOSFET de empobrecimiento de canal N

85. Controlar un relé con un MOSFET de enriquecimiento de

canal N

86. Controlar un relé con un MOSFET de empobrecimiento

de canal N

87. Amplificadores con MOSFET

88. Polarización de una etapa de amplificación de fuente

común con MOSFET de enriquecimiento de canal N

89. Proteger la alimentación de un circuito con P-MOSFET

90. SCR

91. Elegir un SCR

92. Utilizar un SCR con una corriente continua

93. Utilizar un SCR con una corriente alterna

94. Comprobar un SCR con un tester

95. Los TRIAC

96. Elegir un TRIAC

97. Comprobar un TRIAC

98. Utilizar un TRIAC como interruptor de baja tensión

99. Los DIAC

100. Probar un DIAC

101. Regulador de intensidad con TRIAC

102. Utilizar un optoTRIAC

103. Diodo de cuatro capas o diodo Shockley

104. SCS

105. Transistores uniunión UJT y PUT

106. IGBT

107. Comprobar un IGBT

108. Fotodiodos

109. Utilizar un fotodiodo para obtener luz

110. Fototransistores

111. Utilizar un fototransistor para detectar luz

112. Optoacopladores

113. Utilizar un optoacoplador para controlar una corriente mayor

4. AMPLIFICADORES OPERACIONALES

114. Los amplificadores operacionales

115. Elegir un amplificador operacional

116. Comparador de tensiones

117. Búfer

118. Amplificador inversor

119. Amplificador no inversor

120. Crear una alimentación dual a partir de una individual

121. Sumar varias señales con un amplificador operacional

122. Amplificador diferencial

123. Integrador de señal

124. Diferenciador

125. Potenciar la salida de un amplificador operacional

126. Convertidor corriente/tensión

127. Controlar un relé con un amplificador operacional

128. Convertidor tensión/corriente

129. Disparador de Schmitt (histéresis)

130. Oscilador de onda cuadrada

131. Oscilador sinusoidal

Introducción

Han pasado ya unos años desde la publicación de mi primer libro sobre electrónica, *Electrónica para makers*. Un libro que ha gozado de una gran acogida, pero que, desafortunadamente, surgió en un periodo difícil. En aquellos tiempos, estaba empezando a trabajar por mi cuenta y todavía estaba en la empresa de ferrocarriles. Para escribirlo, me levantaba cada día muy temprano. No obstante, aquel libro fue bien valorado por muchos *makers* que necesitaban ayuda para empezar. El espíritu con que lo ideé y, más tarde, escribí es precisamente el de tratar de ayudar al máximo a aquellos que empiezan desde cero.

Este nuevo trabajo sigue la estela de *Electrónica para makers* e intenta profundizar más en los argumentos. Además, en esta ocasión he decidido enfocarlos hacia trucos y secretos, para lo que he dividido los temas en píldoras de pocas páginas. Los temas tratados son los mismos que pueden encontrar en mi canal de YouTube, donde cada día publico un video de electrónica, programación o Arduino.

Escribir un libro de electrónica no es sencillo. Con la ayuda de los videos que publico, he conseguido comprobar en primera persona todos los temas que encontrarán en estas páginas. Esto me permite estar seguro de que las cosas funcionan y, para ustedes, es una garantía de calidad. Siempre surgirán errores, pero con este método creo que los he podido reducir de un modo

considerable, pues han quedado relegados a errores de impresión o pequeños descuidos.

En un principio tuve previsto realizar 100 videos y, por tanto, 100 trucos. El hecho de definir una meta me ha servido para dibujar el objetivo que quería alcanzar. Tal como me imaginaba, el objetivo ha sido alcanzado y superado. ¡Existen muchos más de 100 temas que se pueden abordar cuando se habla de electrónica!

Si ya tienen *Electrónica para makers*, aquí se toparán con algunos temas ya sabidos y distintos conocimientos matemáticos. Para hacer frente a determinados argumentos, es necesario conocer algunos conceptos matemáticos avanzados o, como mínimo, tener una idea sobre ellos. He intentado explicarlo todo del modo más sencillo posible. Verán una primera sección introductoria sobre la electrónica. En las siguientes partes se encuentran los trucos que tratan, en primer lugar, sobre los componentes pasivos, para pasar después a semiconductores, transistores y amplificadores operacionales, todo ello acompañado siempre de ejemplos y experimentos prácticos.

¡Buena lectura!

El canal de video

Todos los trucos de este libro van acompañados de videolecciones publicadas en mi canal de YouTube (<http://www.youtube.com/user/zeppelinmaker>) y en una página web (<http://www.zeppelinmaker.it/elettronica100/>).¹ Cada uno de los temas del libro se explica en un video bastante conciso. Empecé a publicar material en YouTube en el año 2011, primero de forma bastante aleatoria y después cada vez con mayor criterio. Mis primeros videos eran muy brutos: grababa lo que había fabricado sin ninguna explicación ni ningún comentario. Con los años, YouTube ha crecido y se ha convertido en una auténtica red social. Me di cuenta de que podía ser un canal de comunicación potente y muy directo, por lo que estudié los videos de los *youtubers* de éxito para saber cómo debía subir los míos.

Para grabar un video, no se puede improvisar. A pesar de que muchos parezcan caseros, detrás de un video de éxito hay siempre una cierta preparación. Intenté crear algo de valor con un mínimo de estudio y organización. No basta con una simple cámara fotográfica. Esta es fundamental, pero debe ir acompañada de un buen audio. Recuperé un micrófono excelente y varios soportes. Otra cosa importante es la iluminación, la cual conseguí con varias lámparas, ¡y les aseguro que nunca son suficientes!

Mis primeros videos fueron grabados casi a oscuras, más por

necesidad que por elección. El único sitio del que disponía era un espacio en mi desván y solo podía grabar videos cuando todos dormían. Ahora, cuando los miro, me doy cuenta de lo oscuros e incluso inquietantes que eran. ¡Mi voz se oía muy baja porque no podía hablar a gritos! Otro elemento fundamental es el montaje, que requiere tiempo y paciencia. Audio y video deben ir unidos, y en el conjunto se deben eliminar ruidos, tartamudeos, pausas y errores. Para evitar divagaciones, cada video se prepara previamente en papel. No hay un guión real, pero cada uno de los argumentos es estudiado y probado.

Me equipé así porque quería crear algo bueno: producir una cierta calidad. La mayor parte de los videos técnicos grabados en Italia son bastante toscos y decepcionantes.

A menudo no se consiguen los resultados, hay largas divagaciones. Algunos de estos videos fueron grabados con un teléfono móvil sin soporte: las imágenes tiemblan y se mueven. Al ver estos videos, me digo: «Sobre videos sé poco, no soy tan guapo como Johnny Depp... pero soy capaz de hacer algo mejor que la media».

Así que trabajé duro para grabar muchos videos: uno al día, todos los días, publicado a las 9. Vistas las opiniones, un compromiso importante.

Esta táctica ha hecho crecer mi canal hasta los 20 000 suscritos (en diciembre de 2019) y más de 2 000 000 de visualizaciones (que sigue siendo una gota en el océano de YouTube). Un público reducido de apasionados me escribe,

comenta y critica cada día. Mis videos han gustado y muchos me han felicitado:

«Quiero darte las gracias por estos videos, que son los mejores de los que circulan por You-Tube (en cuanto a claridad y practicidad). Muchas gracias de corazón por lo que haces».

Roberto

«Un trabajo excelente, recomendaré tus videos a quienes necesiten manuales o instrucciones».

M.A.

Estos mensajes son la mejor recompensa por todo el tiempo invertido con pasión en mi actividad divulgativa.

Mi equipo

Muchas veces me preguntan qué equipo utilizo. No tengo secretos:

- cámara fotográfica canon D100;
- micrófono Røde Lavalier;
- minimezclador Xenyx con interfaz de audio USB;
- OpenBoard como pizarra con tableta gráfica Wacom Intuos;
- QuickTime para la grabación de la pantalla;
- iMovie para el montaje de los videos.

Estructura del libro

Los proyectos y los temas del libro están organizados en 130 unidades que he pensado definir como trucos. Cada truco presenta un tema completo y unitario. No existe un hilo lógico obligado: pueden leer el libro todo seguido o consultarlo como un manual para resolver los distintos casos con que se pueden encontrar al crear un prototipo.

Si alguno de ustedes ya dispone del libro *Electrónica para makers*, podrá encontrar temas similares. No he podido evitar copiar algunas partes, para algunos argumentos es inevitable, pero allí donde ha sido necesario he intentado añadir algo más o incluir una presentación distinta, de manera que igualmente haya informaciones nuevas e inéditas.

Los trucos del libro están organizados en cuatro secciones que se corresponden con los capítulos:

- un capítulo teórico de introducción con un resumen de las bases teóricas necesarias;
- componentes pasivos, resistores, condensadores y bobinas;
- diodos, transistores, MOSFET, SCR y TRIAC;
- amplificadores operacionales.

He publicado todas las listas y el material utilizado tanto en el libro como en los videos en www.zeppelinmaker.it/book/elettronica-trucchi-e-segrete.html

Quién soy

Todos estos años me he dedicado a muchas actividades y tecnologías cercanas al mundo de los *makers*. He experimentado con *startups* y empresas, e incluso he mudado de piel en muchas ocasiones para dar con un negocio que funcionara. En 2011 fundé Frankenstein Garage y más tarde FabLab Milano: una de las primeras *startups* que volvía a dedicarse al hardware en lugar de al software o a las apps.

Después abrí Fabb srl, dedicada, sin demasiado éxito, a la impresión 3D, hologramas y diseño IoT. Hace unos años puse en marcha REborn ELectronic Company (www.reelco.it), que realiza reparaciones electrónicas industriales. Cada día es un nuevo reto y nos encontramos con maquinaria de todo tipo que casi siempre reparamos con una enorme satisfacción. En poco tiempo he pasado de mi desván a un pequeño laboratorio de alquiler con la ayuda de cinco compañeros de viaje y colaboradores. Parece que este es un buen negocio y que, por fin, las cosas empiezan a moverse...

He escrito algunos libros como *Il manuale del maker* (el manual del maker), traducido al inglés por Make Media Press; algunas obras sobre impresión 3D y otros libros de esta colección como *El manual de Arduino*; *Arduino. Trucos y secretos*; *Electrónica para makers*; y *Reparar (casi) cualquier cosa*.

Pueden contactar conmigo a través de mi sitio web,

www.zeppelinmaker.it, o por correo electrónico en esta dirección: paolo@zeppelinmaker.it.

Advertencias

La corriente eléctrica puede ser muy peligrosa: es invisible y, si uno no es consciente o no está seguro de lo que hace, puede sufrir accidentes graves o mortales. No utilicen nunca la tensión de red a 220 V para sus experimentos. Usen solo pilas, baterías y, de vez en cuando, alimentadores, pero siempre prestando la máxima atención.

Si no están seguros o les surgen dudas, pregunten a un experto, amigo o profesional. En Internet y en Facebook existen muchos sitios y grupos, aunque no es fácil saber si una persona es realmente experta basándonos solo en lo que escribe.

Ni el editor ni yo podemos asumir ninguna responsabilidad por los resultados obtenidos en los experimentos descritos en este libro. No podemos dar cuenta de los accidentes o daños que se podrían producir en cosas, personas o animales durante la realización de estos experimentos en casa. Pongan la máxima atención en todo cuanto hagan y traten de prever las consecuencias de sus acciones.

¹ N. del T.: Todos estos videos explicativos proporcionados por el autor se encuentran en italiano y no están traducidos.

1

Nociones básicas

Para entender el funcionamiento de los circuitos electrónicos, es preciso conocer algunos conceptos teóricos fundamentales: corriente, tensión, resistencia, impedancia. Hablaremos de las leyes de Thevenin, Kirchhoff, Norton, y de las técnicas para resolver circuitos en corriente continua y alterna.

En esta sección encontrarán algunos conceptos fundamentales relacionados con la electrónica y que serán útiles para afrontar los trucos presentados en el libro. Se tratarán las unidades fundamentales y las leyes necesarias para realizar cálculos sobre circuitos y obtener tensiones, corrientes y resistencias. Tomen este apartado como referencia, sobre todo en cuanto a los sistemas para la solución de circuitos. He intentado reducir al mínimo la información necesaria para no penalizar el resto del libro. Se encontrarán con muchos conceptos matemáticos y electrónicos condensados en pocas líneas. He tratado de minimizar las fórmulas y, allí donde ha sido necesario, presentarlas de manera que cualquiera pueda comprenderlas. Algunos de los conceptos matemáticos incluidos se introducen, habitualmente, en cursos avanzados, pero se trata de cosas comprensibles para aquellos que tengan la paciencia y las ganas de dedicar un rato a entenderlas. Les aconsejo, si pueden,

que complementen la lectura del libro con algún conocimiento suyo personal: usen algún libro de matemáticas o aprovechen los infinitos recursos de Internet, actualmente un canal imprescindible para quienes quieren adquirir conocimientos sobre una materia. Muchos de los temas presentados en estas páginas los pueden encontrar en mi canal de YouTube. Pueden decidir leer todo el capítulo o saltarlo para retomarlo más tarde, cuando sea, si lo es, necesario.

Corriente eléctrica

La corriente eléctrica se define como la cantidad de carga que pasa por una determinada sección en un determinado tiempo:

$$i = \frac{\textit{número cargas}}{\textit{tiempo}}$$

Si se fijan, parece una definición similar a la del flujo del agua, entendido como la cantidad de líquido que pasa por una determinada sección en un determinado tiempo. Para el agua, hablamos de litros por segundo, mientras que para la corriente deberíamos hablar de cargas por segundo. La unidad de medida de la carga eléctrica es el culombio. Así, la corriente se mide en culombios por segundo, comúnmente conocidos como amperios.

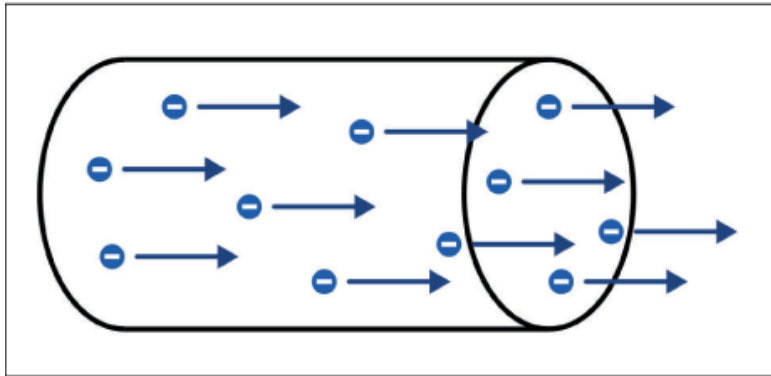


Figura 1.1 – La corriente se produce por el movimiento de cargas dentro de un material conductor.

Para llegar a una definición precisa, necesitaríamos un instrumento con el que medir el número de cargas eléctricas que pasan por una determinada superficie. Es muy difícil realizar una medida instantánea, por lo que imaginen que pueden realizar dos medidas a poca distancia una de otra y obtener el número de cargas resolviendo la diferencia entre las medidas en el momento final y las obtenidas en el momento inicial. De este modo, la definición de corriente pasa a ser:

$$I = \frac{q_2 - q_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Las corrientes se indican normalmente con la letra I, a veces seguida de un número en subíndice, si se debe indicar más de una (por ejemplo i_1 , i_2 , i_3). Sin embargo, la definición que acabamos de ver indica una media matemática: durante un determinado periodo de tiempo, cuento las cargas que pasan por una determinada sección y, después, las divido por el tiempo transcurrido. Se puede llegar a una definición lo más exacta posible y, por tanto, instantánea, si se reduce al máximo el intervalo de tiempo que se ha de medir. Dicha definición se denomina operativa porque afronta el problema desde un punto de vista práctico y ofrece una solución que requiere el uso de instrumentos y medidas. Sin embargo, para medir la corriente, no utilizamos un detector de cargas eléctricas, sino un instrumento denominado amperímetro, el cual nos proporciona directamente la medida en amperios. De hecho, un amperio equivale a una cantidad de carga igual a un culombio que pasa por una determinada sección en un segundo.

Sabiendo que un electrón tiene una carga de -1.6×10^{-19} C, podemos obtener el número de electrones que dan vida a nuestro amperio:

$$\text{número de electrones} = \frac{1}{1.6 \times 10^{-19}} = 6\,250\,000\,000\,000\,000\,000$$

El símbolo utilizado para indicar los amperios es la letra A. Por lo tanto, una corriente de 10 amperios se indicará de la

siguiente manera:

$$i_1 = 10 \text{ A}$$

En electrónica, se suele trabajar con corrientes muy pequeñas, por lo que se utilizan fracciones de amperios, como los miliamperios ($1 \text{ mA} = 0.001 \text{ A}$ o 10^{-3} A) o los microamperios ($1 \mu\text{A} = 0.001 \text{ mA}$ o 0.000001 A o 10^{-6} A).

Las cargas de las que hablamos son los electrones, que pueden moverse libremente dentro de algunos materiales concretos, por lo general de tipo metálico y, por tanto, denominados conductores. Podemos obtener una corriente a partir de un generador que puede ser una batería o un alimentador. Las baterías y los alimentadores tienen dos polos, es decir, dos terminales (o bornes, como les gusta denominarlos a los electrotécnicos), uno positivo e identificado con el signo +, y otro negativo e identificado con el símbolo -. En un principio, se pensaba que la corriente estaba determinada por el movimiento de cargas positivas que salen del polo positivo, que fluyen por un circuito y terminan en el polo negativo. Estudios posteriores descubrieron que la corriente estaba generada por el movimiento de cargas negativas, los electrones, y que, por tanto, el sentido correcto era del polo negativo al positivo. A fines prácticos, decir que las cargas positivas se mueven del polo positivo al negativo o que las cargas negativas se mueven del polo negativo al positivo es lo mismo.

Para tener una muestra visual de cómo circula la corriente por un circuito, es habitual indicarla en los esquemas electrónicos

con una flecha superpuesta o flanqueada por las ramas de un circuito. En la [figura 1.2](#) podemos ver un simple circuito donde el generador está representado por una batería B1 a la cual se encuentra conectado un componente genérico C1. En los extremos de este componente encontramos la misma tensión proporcionada por la batería B1. La corriente que surge del generador no puede hacer otra cosa que pasar a través del componente C1 para, después, regresar al polo negativo de la batería.

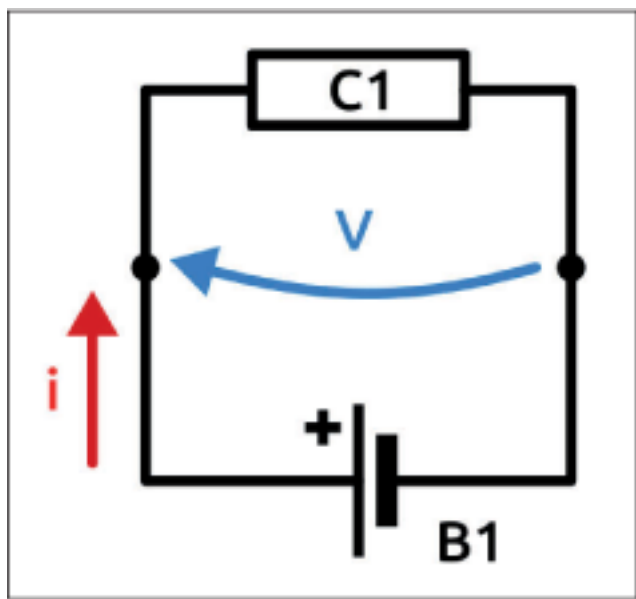


Figura 1.2 – Generador conectado a un componente eléctrico. La corriente y la tensión están indicadas mediante dos

flechas.

Podemos tener corrientes continuas y, por consiguiente, caracterizadas por un flujo constante de cargas que se desplazan de un polo al otro de nuestro generador, o bien corrientes variables. Una corriente continua es mucho más sencilla de tratar que una corriente variable. Las corrientes variables pueden ser de naturaleza distinta. Podemos tener corrientes que varían de un modo regular, por ejemplo, con un movimiento de onda o sinusoidal, y que, por ello, tienen una determinada frecuencia, o corrientes que cambian de un modo más complejo. Las corrientes variables se pueden analizar y estudiar mediante fórmulas matemáticas más o menos complejas. En cualquier caso, incluso las ondas más complicadas se pueden describir como una suma más o menos compleja de ondas simples.

Tensión

Hemos dicho que la corriente se origina por un movimiento de cargas eléctricas. ¿Qué puede hacer desplazar las cargas eléctricas? Un campo eléctrico. Podemos crear un campo eléctrico cuando tenemos concentraciones de cargas en el espacio. Si han probado alguna vez a frotar un globo sobre un jersey de lana, ya sabrán de qué estamos hablando. Al frotar el globo sobre la superficie, se carga eléctricamente y podemos detectar la presencia de cargas porque, si acercamos el globo a nuestro pelo, si todavía nos queda alguno, su superficie los atrae. Este es un sencillo ejemplo de campo eléctrico.

Al conectar un conductor entre dos polos de un generador, cerramos un circuito y conseguimos que dentro del conductor se establezca un campo eléctrico. Las partículas presentes en el campo eléctrico sufrirán una fuerza, denominada fuerza electromotriz, que las pondrá en movimiento y, por tanto, podremos generar una corriente. Cuando hablamos de tensión o de voltaje, nos referimos a la diferencia de potencial entre dos puntos. El potencial de un punto lo produce la energía (potencial) que posee una partícula en dicha posición. En cambio, la diferencia de potencial eléctrico es el trabajo necesario para mover una carga de un punto a otro.

Retomando la metáfora acuática, podemos decir que la tensión es comparable a la altura desde la cual cae el agua o a la

inclinación de un tubo. Si queremos que circule el agua, el tubo debe inclinarse.

La tensión es una medida relativa y siempre se refiere a dos puntos. Hablaremos de tensión entre el punto A y B indicándolo con las letras V_{AB} .

$$V_{AB} = V_A - V_B$$

La letra V se utiliza tradicionalmente para indicar la tensión. Cuando esta muestra una única letra, no es absoluta, pero significa que se refiere a masa o al punto de tierra, es decir, a un punto que por convención asumimos que tenga un potencial 0 y, normalmente, corresponde al negativo del generador o la batería que utilizamos para alimentar el circuito.

De forma parecida a la corriente, podemos dar una definición operativa de la tensión de este modo:

$$V_{AB} = \frac{U_A - U_B}{q} = \frac{\Delta U}{q}$$

La tensión se obtiene de la relación entre la diferencia de energía potencial de dos puntos, dividida entre la cantidad de carga. Sin olvidar que el joule es la unidad de medida de la energía, podemos medirlo así:

$$\frac{1J}{1C} = 1 \text{ } V$$

La unidad de medida es el voltio. Podemos medir fácilmente una diferencia de potencial con un voltímetro o un multímetro común.

Ley de Ohm

Una de las leyes fundamentales de la electrónica necesaria para la resolución de circuitos es la ley de Ohm, que vincula la tensión y la corriente a través de la resistencia:

$$V = I \cdot R$$

La resistencia se mide en ohmios, unidad de medida que toma el nombre del físico alemán Georg Ohm, quien, a principios de 1800, estudió las relaciones entre corriente y tensión, y los efectos producidos sobre distintos materiales. El símbolo del ohmio es la letra griega omega: Ω . Los componentes que se utilizan normalmente en electrónica tienen resistencias que van de fracciones de ohmio (miliohmios) a megaohmios. El símbolo que se suele utilizar para representar las resistencias es una línea en zigzag con dos terminales o, en algunos casos, un simple rectángulo. Las resistencias se indican con la letra R normalmente numerada en subíndice: R_1 . Las resistencias son componentes sin polarizar: es posible invertir sus terminales sin que cambie su comportamiento. El efecto producido por una resistencia es el de frenar el paso de los electrones y, por tanto, determinar una caída de tensión. Es comparable, volviendo a la metáfora hidráulica, a un tubo estrangulado.

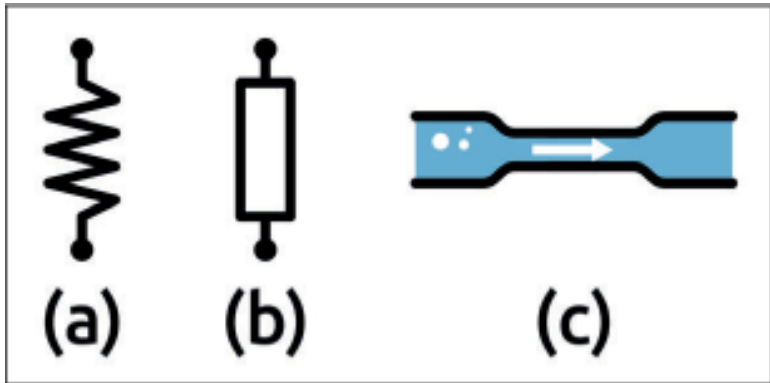


Figura 1.3 – Símbolos (a) (b) utilizados normalmente para indicar una resistencia y un dibujo (c) que la representa como un tubo estrangulado.

A menudo, en electrónica también se trabaja con el inverso de la resistencia, es decir, la conductancia, indicada habitualmente con la letra G (también en minúsculas). La conductancia se mide en siemens. El símbolo se indica unas veces con una s y otras con un ohmio invertido o bien con $1/\text{ohm}$.

En el campo electrónico tenemos dispositivos que funcionan como generadores, que proporcionan corriente y tensión, y dispositivos que se comportan como usuarios. Un resistor es un dispositivo que cuenta con dos terminales que opone una cierta resistencia al paso de la corriente. Si conectamos un generador al resistor, estamos aplicando una tensión V a sus extremos. La corriente absorbida por el resistor depende precisamente de su

resistencia y está definida por la ley de Ohm.

La corriente suele ser representada con una flecha apoyada o superpuesta a uno de los terminales, mientras que la tensión es una flecha que va de un punto a otro del circuito. En algunos casos, en lugar de una flecha se utilizan los signos + y -.

Vamos a suponer que tenemos un generador de tensión que puede proporcionar un voltaje de 12 V. Al conectar a sus bornes una resistencia, fijaremos la corriente que circula en el circuito. Suponiendo que medimos 10 mA, podemos obtener el valor de la resistencia conectada:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{12 \text{ V}}{20 \text{ mA}} = \frac{12 \text{ V}}{0.020 \text{ A}} = 600 \text{ } \Omega$$

Existe una segunda formulación de la ley de Ohm, denominada macroscópica, de tipo más experimental. Teniendo en cuenta que todos los materiales pueden transportar corriente más o menos bien o no transportar nada (aislantes), es posible obtener un coeficiente de resistividad (ρ). Conociendo la resistividad de un material, podemos obtener el valor de su resistencia, el cual está vinculado a la longitud (l) y a su sección (S).

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

Cuanto mayor es la longitud del material, mayor será la resistencia medida. En cambio, la resistencia disminuye cuando crece la sección: a mayor sección, menor resistencia. La resistividad de los metales depende también de la temperatura.

Tabla 1.1 – Resistividad de algunos materiales.

Material	Resistividad (Ωm)
Plata	1.63×10^{-8}
Cobre	1.72×10^{-8}
Hierro	6.54×10^{-8}
Aluminio	2.82×10^{-8}
Vidrio	10^{12}
Teflón	10^{23}

Conexiones en serie y en paralelo

Un circuito eléctrico está formado por un conjunto de componentes eléctricos conectados entre sí. Los componentes también se conocen como dipolos, para indicar que están dotados de dos terminales definidos como polos o hilos conductores. Podemos tener dos tipos de conexión fundamentales:

- conexión en serie;
- conexión en paralelo.

En la conexión en serie, los componentes están conectados de modo que realizan un recorrido único por la corriente que fluirá a través de ellos. El terminal de un componente está directa y únicamente conectado al terminal del componente siguiente. La tensión se aplicará a los terminales libres situados en los extremos de la serie.

En la conexión en paralelo los componentes tienen sus dos terminales conectados a dos líneas de las cuales toman la tensión de alimentación. La corriente se dividirá entre los distintos componentes según las características de cada elemento individual. A los extremos de cada componente se aplicará la misma tensión de alimentación.

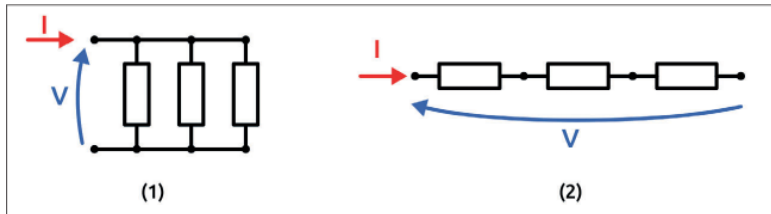


Figura 1.4 – Conexión de varios dipolos en paralelo (1) y en serie (2).

Por todos los resistores en serie fluye la misma corriente y el valor total de todos los componentes será igual a la simple suma de cada uno de los valores:

$$R_{tot} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots = \sum_{i=1}^N R_i$$

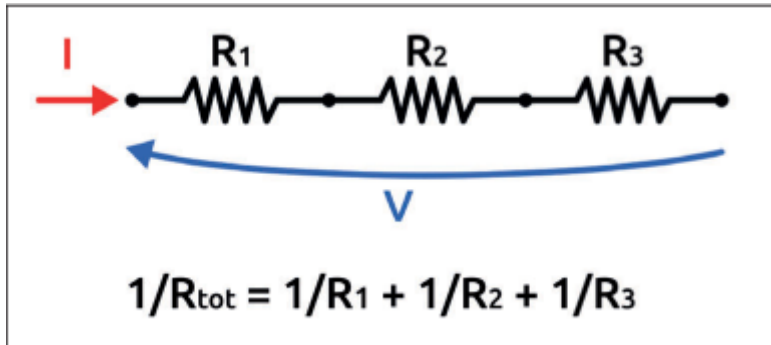


Figura 1.5 – Conexión de varios resistores en serie: por cada uno de ellos pasa una única corriente.

Varios resistores en paralelo se encuentran sometidos a la misma tensión. La corriente proporcionada se divide entre las distintas resistencias. El cálculo del valor de la resistencia equivalente es más complejo:

$$\frac{1}{R_{\text{tot}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}$$

Debemos calcular el valor de la suma de los valores inversos de cada una de las resistencias y después invertirlo para obtener la resistencia equivalente.

En el caso de que haya solo dos resistencias en paralelo, la

fórmula se simplifica y se puede escribir de este modo:

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2}$$

Así, al invertirla, sería como sigue:

$$R_{tot} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Si las resistencias tienen el mismo valor, el valor de la resistencia equivalente es igual a la mitad de su valor nominal:

$$R_{tot} = \frac{R \cdot R}{R + R} = \frac{R^2}{2R} = \frac{R}{2}$$

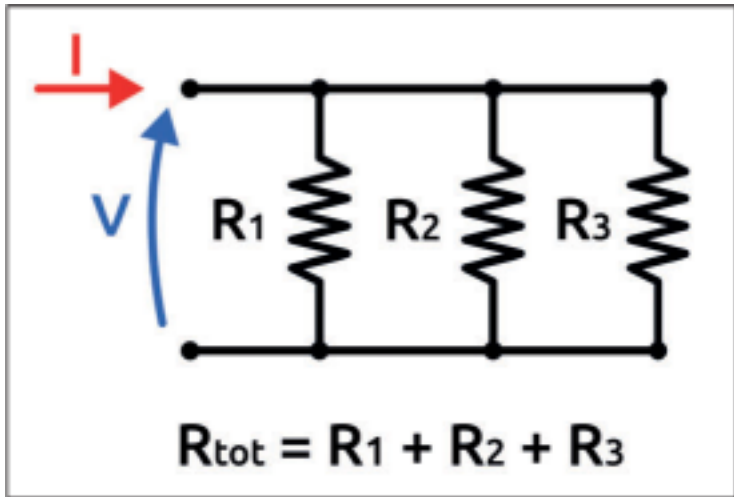
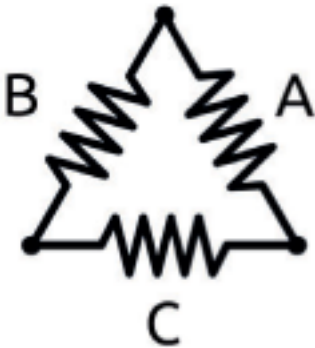


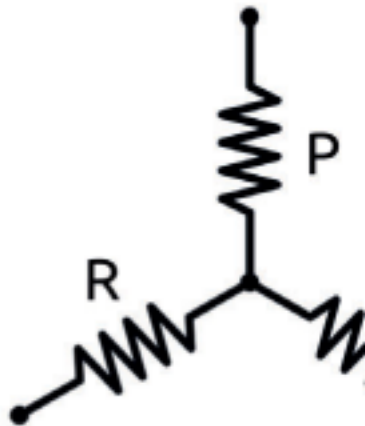
Figura 1.6 – Conexión de varias resistencias en paralelo: se aplica una única tensión a los extremos de todos los resistores.

Conexión en estrella y en triángulo

De forma ocasional podríamos encontrarnos con conexiones distintas a aquellas en serie y en paralelo que se denominan conexiones en estrella o en triángulo. En la conexión en estrella las tres resistencias tienen uno de sus terminales conectado en común, mientras que en la conexión en triángulo las resistencias forman, precisamente, un triángulo. Una configuración de este tipo dentro de un circuito podría dar algún problema, pero habitualmente se puede resolver simplificándolo y pasando de una configuración a otra.



(1)



(2)

Figura 1.7 – Conexión de varios resistores en una configuración en triángulo (1) y en estrella (2).

Las fórmulas para pasar de una configuración a otra no son sencillas y requieren la comparación de dos circuitos, teniendo en cuenta caso por caso aquello que se observa en un par de terminales cada vez. A continuación, les presento solo las fórmulas finales. Para el paso de **triángulo a estrella**, haciendo referencia a los nombres de las resistencias visibles en la [figura 1.7](#), tenemos que:

$$P = \frac{A \cdot B}{A + B + C}$$

$$Q = \frac{A \cdot C}{A + B + C}$$

$$R = \frac{B \cdot C}{A + B + C}$$

En cambio, para pasar de **estrella a triángulo**, utilizaremos las siguientes fórmulas:

$$A = \frac{PQ + QR + RP}{R}$$

$$B = \frac{PQ + QR + RP}{Q}$$

$$C = \frac{PQ + QR + RP}{P}$$

Generadores

En esta breve descripción acerca de qué son la corriente y la tensión eléctrica ha aparecido un generador, representado como una batería. En electrónica tenemos dos tipos de generadores:

- generadores de tensión;
- generadores de corriente.

Los generadores de tensión son aquellos que nos son más familiares, porque es más fácil encontrarlos en nuestra vida cotidiana. Una batería podría considerarse con bastante fidelidad un generador de tensión, es decir, un dispositivo capaz de proporcionar una tensión fija en sus extremos. Mientras la tensión es fija, la corriente es variable y depende de aquello que conectemos al generador. Un generador teórico o ideal puede proporcionar una corriente que parte de 0 y llega hasta el infinito. El primer caso se comprueba con un circuito abierto, mientras que el segundo se hace con un cortocircuito. El valor de la corriente se puede determinar mediante la ley de Ohm.

Los generadores se consideran dispositivos activos, es decir, capaces de proporcionar corriente y tensión a un circuito. Se representan como dipolos, es decir, con un símbolo gráfico dotado de dos terminales o bornes con polaridad. Un borne corresponde al polo positivo (+ y de color rojo) y el otro se asocia al polo negativo (- y de color negro). Por convención, en sus extremos encontraremos tensión cuando la corriente salga del

polo positivo.

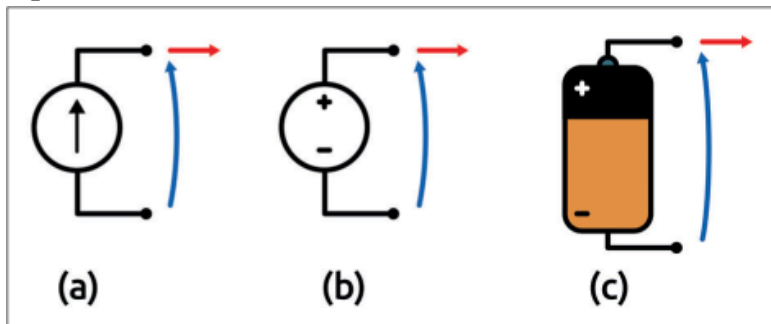


Figura 1.8 – Por convención, los generadores proporcionan una corriente que surge de su terminal positivo (la corriente se indica con una flecha de color rojo).

Los generadores de corriente se comportan de manera dual y pueden proporcionar una cantidad predeterminada de corriente. En este caso, aquello que variará será la tensión en los extremos del generador, que dependerá de lo que le conectemos.

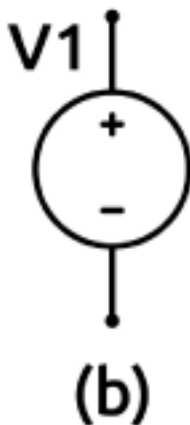


Figura 1.9 – Símbolos de algunos tipos de generadores: (a) generador de corriente, (b) generador de tensión, (c) generador de corriente (símbolo alternativo), (d) generador de tensión (símbolo alternativo), (e) generador controlado por corriente, (f) generador controlado por tensión.

En electrónica también se suelen utilizar generadores controlados. Este tipo de generadores no existe realmente porque son solo modelos útiles para tratar tipos de componentes concretos. En la [figura 1.9](#) se puede ver el símbolo de un generador controlado por corriente (e) y de un generador controlado por tensión (f). Un generador de corriente controlado produce una corriente que depende de otras magnitudes (tensiones o corrientes) detectadas dentro del circuito en el cual

se encuentra. El generador de tensión controlado se comporta del mismo modo, detecta una magnitud eléctrica a la entrada y produce una tensión controlada. Un ejemplo podría ser un amplificador que produce una tensión de salida V_o al tomar la tensión de entrada V_i y aplicarle una ganancia A_v .

$$V_o = V_i \cdot A_i$$

Los generadores reales se comportan de forma distinta a los teóricos. El alimentador de laboratorio es el objeto más parecido a un generador de tensión. Podemos aplicar una tensión de trabajo y el alimentador, una vez conectado a una carga o a un circuito, proporcionará una corriente que podrá llegar al valor máximo previsto para aquel tipo de alimentador. Un alimentador de laboratorio común puede alcanzar, por ejemplo, los 5 o 10 A: esta es la capacidad máxima que tiene de proporcionar corriente y se puede consultar en el manual o en alguna etiqueta colocada sobre el objeto. Podemos crear un modelo matemático para los generadores reales simplemente añadiendo una resistencia en serie a un generador ideal. Para obtener un generador de corriente real (objeto más o menos común), añadiremos una resistencia en paralelo al generador de corriente. La resistencia interna permite tener en cuenta posibles caídas de tensión y disipación de potencia inversa. Cuando se conecta una carga, la tensión o la corriente nominales mensurables en sus terminales varían en función de la carga conectada.

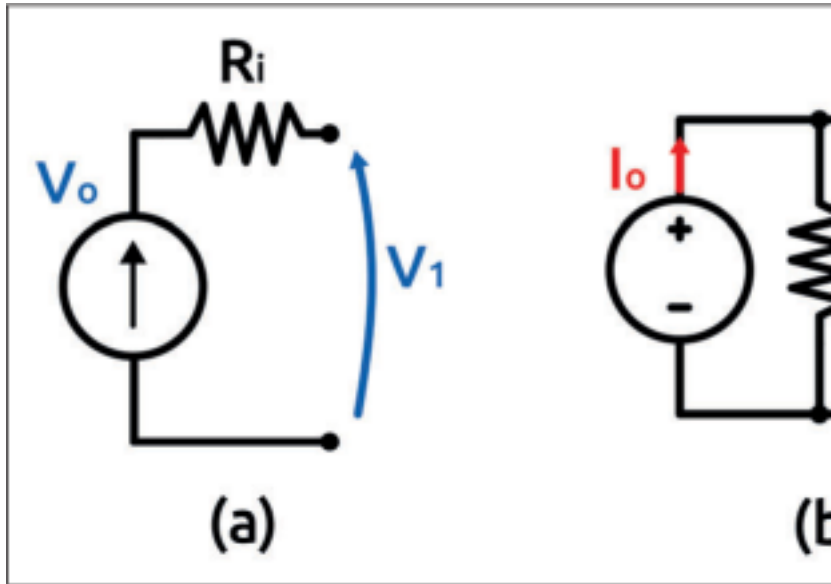


Figura 1.10 – Modelo de un generador de tensión real (a) y de un generador de corriente real (b).

En el modelo de generador de tensión real ([figura 1.10](#)), la tensión nominal V_0 se detecta en ausencia de carga. Debido a la presencia de la resistencia interna R_i al conectar una carga al generador, la corriente real detectada (V_1) será sensiblemente distinta a V_0 , según la carga conectada. Ocurre algo parecido con un generador de corriente.

La metáfora acuática

Cuando empecé a interesarme por la corriente eléctrica, a los diez años, leí un libro divulgativo donde la corriente eléctrica se comparaba con el agua que circula por las tuberías. Esta metáfora ayuda a comprender muchas cosas y a hacerse una idea inicial de lo que puede ocurrir dentro de los cables y los componentes eléctricos. La corriente, igual que un fluido, se propaga por el interior de los cables hasta llegar a los distintos componentes. La tensión, en este modelo acuático, queda representada con la inclinación del tubo, necesaria para que el agua pueda ponerse en movimiento.

Por tanto, tenemos un generador del que surge este fluido invisible, pero necesitamos también una descarga donde recogerlo y volver a ponerlo en circulación. Un concepto común tanto en el enfoque eléctrico como en el hidráulico es la idea de circuito, es decir, un recorrido cerrado por donde el fluido pueda circular.

Sin embargo, la corriente no es un fluido, e intentar aplicar esta metáfora a los casos con que podemos encontrarnos mientras estudiamos electrónica nos puede hacer cometer errores bastante gordos. Aunque la corriente eléctrica está generada por un movimiento de partículas cargadas, imaginarlas como un montón de pelotas de ping-pong que rebotan dentro de un tubo puede conllevar problemas de interpretación. El agua

y las pelotas de ping-pong son objetos con una determinada materialidad y que podemos tocar con la mano: tienen una masa y una velocidad. En algunos casos, se ha llegado a pensar que estas pelotas emplean un tiempo concreto para alcanzar los distintos elementos de un circuito, precisamente porque se caracterizan por una determinada masa y están sometidas a una fuerza o presión. Esto implica también un concepto de dirección: el agua circula desde el grifo, dentro del circuito, hasta llegar al desagüe. Uno de los mayores problemas de este enfoque es que, cuando un principiante se enfrenta a un simple circuito formado por una batería en serie con una lámpara y una resistencia, podría llegar a pensar que el comportamiento del circuito depende del orden de los componentes.

Si un cable es equiparable a un tubo y el agua circula partiendo del polo positivo hasta llegar al polo negativo, y si una resistencia es un estrechamiento del tubo, entonces la posición de la resistencia es importante. Si el flujo encuentra primero la resistencia y después la lámpara, esta emitirá poca luz, porque el agua se ralentizará a causa del estrechamiento del tubo (la resistencia) para pasar después a la lámpara. En cambio, si la lámpara está colocada antes de la resistencia, entonces la resistencia no tendrá ningún efecto.

En realidad, el hecho de que la resistencia esté antes o después de la lámpara no cambia nada. Para explicarlo en términos sencillos, es como si la corriente no tuviera en cuenta el camino, sino el circuito que debe recorrer en su totalidad... como si fuera

visionaria.

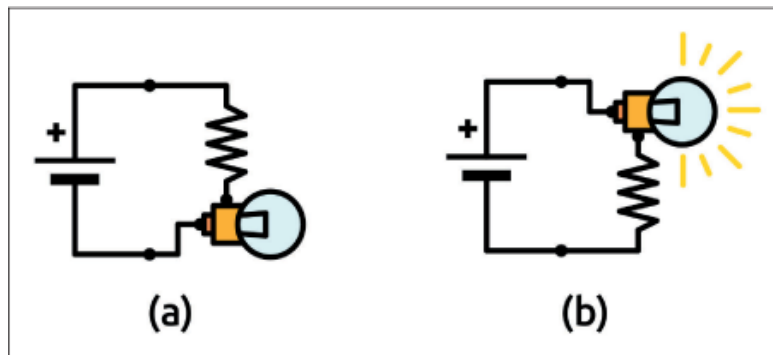


Figura 1.11 – Circuito con batería, resistencia y lámpara... Si invierto la posición de lámpara y resistencia, ¿cambia algo? ¡En realidad, ambos casos son idénticos!

Realmente, la corriente eléctrica se manifiesta porque se establece un campo eléctrico dentro del conductor. Esto ocurre en cuanto cerramos los contactos del circuito y conectamos un generador cuyos polos están situados a distintos niveles de potencial eléctrico. Las cargas eléctricas, los electrones, no son pelotitas: la física moderna los describe como nubes de probabilidad compuestas de elementos cuánticos. Por lo tanto, pueden entender que el tema no es tan sencillo.

Potencia

Seguramente se habrán dado cuenta de que la definición de potencia, en electrónica, resulta un tema bastante espinoso. De hecho, existen múltiples maneras de definirla y medirla que generan bastante confusión.

Para desarrollar cualquier tipo de trabajo, se necesita energía. Si quieren subir diez pisos por la escalera y van con el estómago vacío, sin duda alguna se cansarán. Para hacer que sus piernas se muevan, antes deberán incorporar energía en forma de comida, como un plato de espaguetis. La comida puede proporcionar la energía necesaria para realizar un trabajo.

Una vez captada la energía, pueden decidir la velocidad con que la consumiremos. Si suben tranquilamente, llegarán al décimo piso sin quedarse sin aliento, como sí habría ocurrido si hubieran subido las escaleras corriendo. La cantidad de energía necesaria siempre es la misma; lo que cambia es el tiempo necesario para llevar a cabo la operación, es decir, la potencia empleada definida, precisamente, como energía de la unidad de tiempo. Cuanto menor sea el tiempo utilizado para llevar a cabo un trabajo, mayor será la potencia. En electrónica y electrotecnia, cuando se debe trabajar con magnitudes continuas, la potencia se define con una fórmula muy simple:

$$P = V \cdot I$$

La potencia se obtiene del producto de la tensión por la

corriente que se aplican a un dispositivo o a un componente. Una definición más precisa de potencia explica que esta es igual al trabajo aplicado a una carga eléctrica en un segundo. La potencia es, por tanto, el trabajo necesario para desplazar una carga eléctrica inmersa en un campo eléctrico. La potencia se mide en vatios.

Si nos imaginamos que tenemos una lámpara de 12 V por la cual circula una corriente de 0,5 A, podemos concluir que la lámpara absorbe una potencia igual a:

$$P = 12V \cdot 0.5A = 6W$$

Un dispositivo con una potencia mayor, como ya sabemos, es capaz de desarrollar un trabajo mayor: un taladro de 600 W es mucho más potente que uno de 250 W.

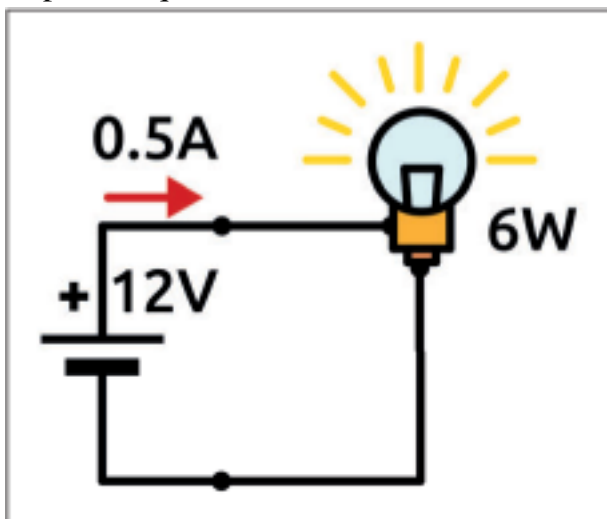


Figura 1.12 – Una lámpara de 12 V que absorbe 0,5 A de potencia consume 6 W de potencia.

La potencia instantánea se calcula mediante las magnitudes instantáneas, como hemos hecho en el ejemplo de la lámpara, es decir, medidas en un determinado instante. En electrotecnia, se habla también de potencia media y existen distintas definiciones que dependen de cómo se mide.

Combinando la ley de Ohm con la fórmula de la potencia, es posible obtener fórmulas para calcular la potencia conociendo el valor de la resistencia y la tensión o bien la resistencia y la corriente. Con la ley de Ohm, con la fórmula:

$$V = R \cdot I$$

y sustituyéndola en la fórmula de potencia, se obtiene:

$$P = V \cdot I = (R \cdot I) \cdot I = R \cdot I^2$$

Se puede hacer igual con la corriente. Para la ley de Ohm podemos escribir:

$$I = \frac{V}{R}$$

y al sustituirla en la fórmula de la potencia tenemos:

$$P = V \cdot I = V \cdot \left(\frac{V}{R} \right) = \frac{V^2}{R}$$

Leyes de Kirchhoff

Para resolver un circuito eléctrico, es necesario previamente definir unas convenciones, es decir, establecer un sentido predefinido, el cual será considerado como positivo para la circulación de las corrientes y las tensiones. Imaginemos que tenemos un simple circuito formado por un generador y una resistencia. Ya hemos visto que los generadores están considerados dipolos activos, con la corriente en salida de su polo positivo. En un circuito tenemos componentes activos y pasivos. A los extremos de un componente o dipolo pasivo encontramos una tensión y por él pasará una corriente. Por convención veremos que la corriente entrará en el borne positivo. Si indicamos gráficamente la tensión como una flecha en los extremos del dipolo, la corriente entrará en el terminal tocado por la punta de la flecha de la tensión ([figura 1.13](#)).

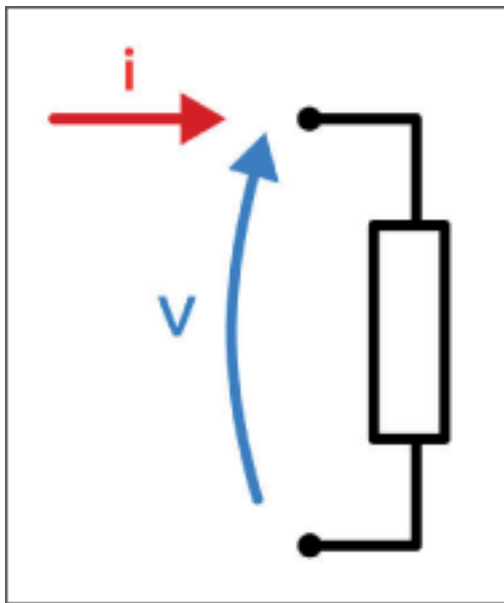


Figura 1.13 – En un dipolo pasivo, por convención, la corriente entrará en el terminal que corresponde al polo positivo (punta de la flecha de la tensión aplicada).

Para resolver circuitos simples, formados solo por resistencias, no se necesitan cálculos complejos y habitualmente basta con combinar entre sí las distintas resistencias hasta llegar a una única resistencia equivalente. Podrán consultar algún ejemplo de resolución de este tipo de circuitos más adelante en este libro. Los circuitos reales son normalmente más complejos y no presentan simples redes de resistores. Para resolverlos, se necesitan métodos más adecuados, como el uso

de las dos leyes de Kirchhoff, que son aplicaciones prácticas del principio de conservación de la energía. El objetivo de las leyes de Kirchhoff es el de ayudarnos a escribir un determinado número de ecuaciones para resolver el circuito. Para hacerlo sin ambigüedades, necesitamos como mínimo una ecuación para cada incógnita.

La ley de Kirchhoff para las tensiones afirma que:

la suma de las tensiones en una malla siempre es igual a cero.

$$V_1 + V_2 + V_3 + \dots = 0$$

O de un modo más compacto:

$$\sum_i^{\text{loop}} V_i = 0$$

Para entender mejor el funcionamiento, necesitamos un circuito eléctrico formado por varios resistores. El circuito propuesto incluye varias mallas y la ley de Kirchhoff vale para cada recorrido cerrado que podemos identificar: ¡sería como una especie de sudoku!

Consideremos el circuito de la [figura 1.14](#), formado por varios generadores y alguna resistencia.

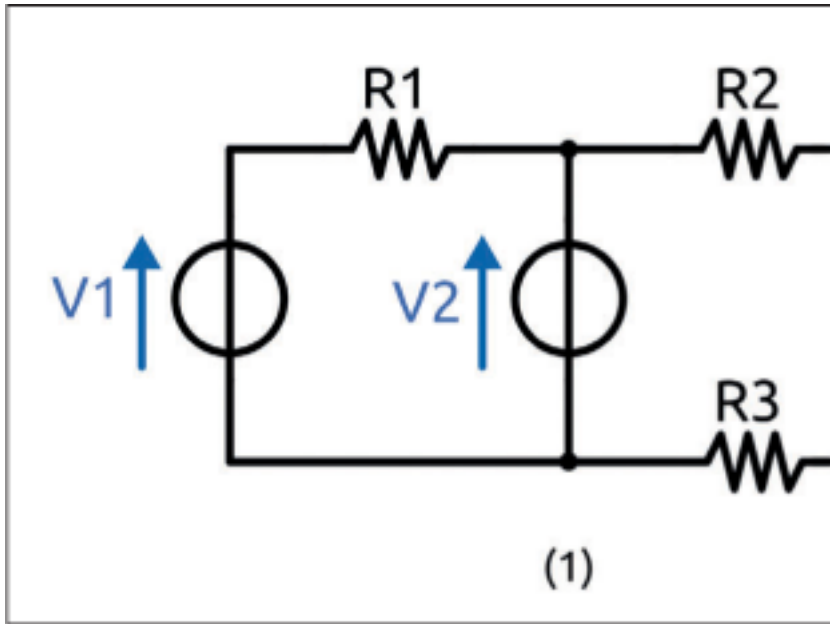


Figura 1.14 – Circuito formado por generadores y resistencias (1); la convención que se debe utilizar para las tensiones (2).

Antes de reflexionar acerca del circuito, debemos definir una convención para las tensiones. Normalmente se elige un sentido de rotación, como se ve en la [figura 1.14](#) (2). Una vez elegida una malla, todas las tensiones que se orientan como en la convención escogida se considerarán positivas. Los sentidos de las tensiones los elegimos a nuestro gusto, pero habitualmente se intenta seguir la convención para generadores y dipolos pasivos.

Si dibujamos la tensión como una flecha por encima de los

componentes, tendremos para los generadores la punta de la flecha de la tensión sobre el terminal positivo del cual sale la corriente, mientras que para los dipolos pasivos, la punta de la flecha de la tensión estará en el terminal por el cual entra la corriente.

Cuando empezamos a analizar un circuito, no sabemos todavía cuáles serán los valores y los sentidos finales de las tensiones y las corrientes y, por tanto, nos contentaremos con marcar las tensiones intentando respetar estas reglas. Descubriremos si nuestras hipótesis son correctas solo tras haber completado todos los cálculos.

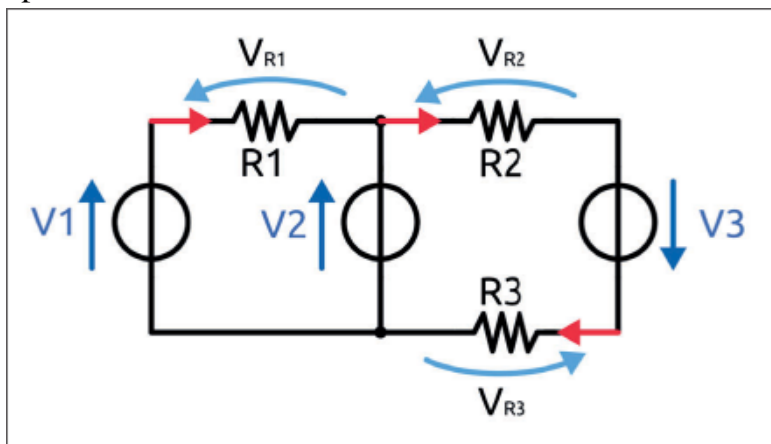
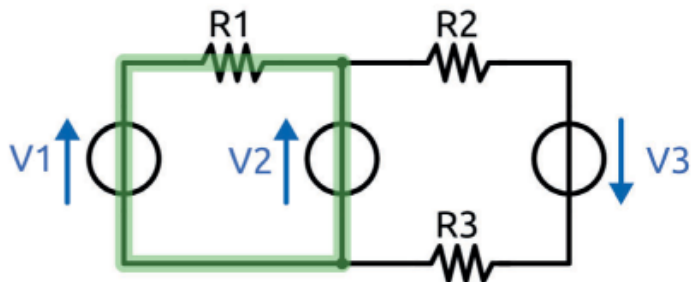


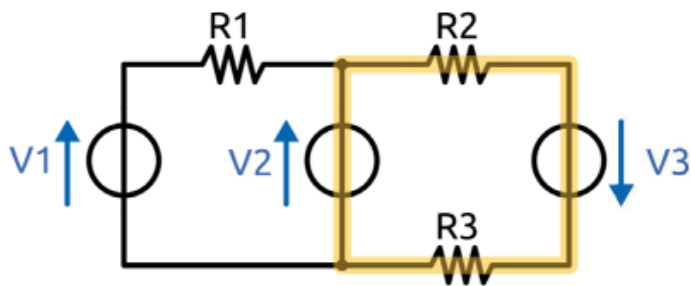
Figura 1.15 – Asociamos las tensiones a los componentes del circuito.

Después de haber asociado las tensiones a los distintos

componentes, podemos empezar a elegir los circuitos. El circuito que estamos examinando presenta tres mallas.



(1)



(1)

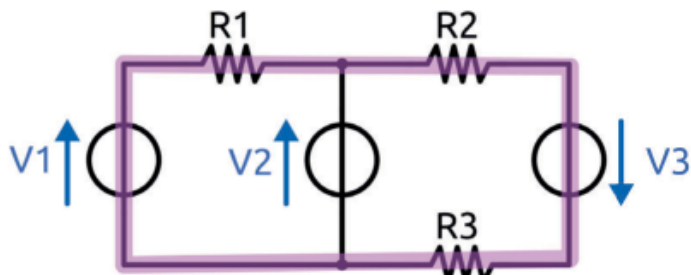


Figura 1.16 – Las tres mallas presentes en el circuito.

Para cada malla debemos escribir una ecuación. Consideramos la primera malla y nos imaginamos que la recorremos partiendo del generador V_1 . Todas las flechas de la tensión presentes en la malla, que se corresponden con la convención que hemos elegido (sentido horario = positivo), tendrán el signo positivo, mientras que las flechas dispuestas en sentido contrario las marcaremos con signo negativo. Así, para la primera malla tenemos:

$$V_1 - V_{R1} - V_2 = 0$$

Para la segunda malla tenemos:

$$V_2 - V_{R2} + V_3 - V_{R3} = 0$$

Y para la tercera:

$$V_1 - V_{R1} - V_{R2} + V_3 - V_{R3} = 0$$

Ahora sale a ayudarnos la segunda ley de Kirchhoff, que se ocupa de las corrientes y afirma que:

la suma de las corrientes entrantes en un nodo es igual a la suma de las corrientes salientes.

También en este caso tenemos una conservación de energía y todo parece razonable. La corriente que sale de un nodo no puede ser distinta a la que entra. Por nodo entendemos un punto en el cual confluyen varios terminales, procedentes de distintos componentes del circuito.

$$I_1 + I_2 + I_3 + \dots = 0$$

O de un modo más resumido:

$$\sum_{i \text{ node}} I_i = 0$$

Para sumar las corrientes sin problemas también necesitamos una convención. Podemos asumir que las corrientes que entran en un nodo siempre son positivas y las que salen son negativas. Por tanto, podemos proceder a la elaboración de las ecuaciones que pueden ser escritas para cada nodo del circuito. Llegados a este punto, está claro que, si conocemos todos los valores de las resistencias y los generadores de tensión de nuestro circuito, las incógnitas serán las corrientes que circulan por las distintas ramas. Las ecuaciones de Kirchhoff permiten calcular estas corrientes para todo tipo de circuito. Si conocemos las corrientes, podemos obtener también los valores de tensión presentes en cada rama del circuito. Con el circuito presentado en la [figura 1.17](#) podemos identificar dos nodos, A y B, y, por tanto, podemos escribir las ecuaciones para las corrientes mediante la convención por la cual las corrientes que entran en el nodo son positivas.

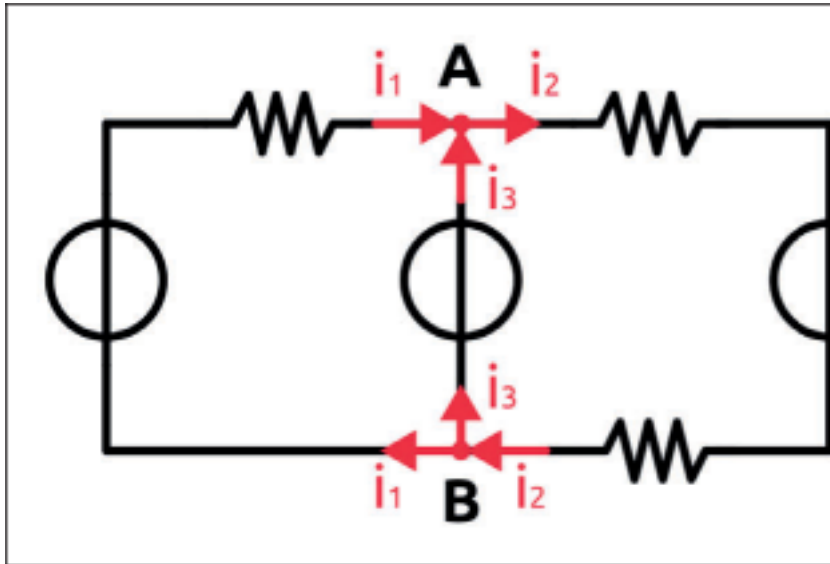


Figura 1.17 – El circuito con las corrientes entrantes y salientes en los nodos A y B destacadas.

Tomemos en consideración el nodo A y procedamos a suponer las corrientes que circulan por él. Si, sin saber aún los resultados finales, lo anoto con una i_1 y una i_2 entrantes, y una i_3 saliente y, a continuación, tras haber desarrollado los cálculos, obtengo:

$$I_1 = 1\text{A}, I_2 = 1.5\text{A}, I_3 = 2.5\text{A}$$

significa que he elegido correctamente el sentido de las flechas que indican las corrientes en el nodo. En cambio, si me encuentro una corriente con signo negativo:

$$I_1 = -1\text{A}, I_2 = 2\text{A}, I_3 = 1\text{A}$$

significa que el sentido que he supuesto para i_1 simplemente

es erróneo y estaría al revés: i_1 no es entrante, sino saliente.

Por tanto, podemos escribir la ecuación para el nodo A del siguiente modo:

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

Consideremos ahora el nodo B. Observando bien el circuito, podemos realizar hipótesis sobre las corrientes y vemos que en el nodo B circulan las mismas corrientes I_1 , I_2 e I_3 , pero con sentidos distintos. De hecho, puedo pensar que por una rama de mi circuito la corriente que sale de un extremo puede ser igual a la que entra por la parte opuesta. Así, para el nodo B tenemos:

$$-I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

Nuestro circuito tiene, por consiguiente, tres incógnitas en total, que equivalen a las tres corrientes, I_1 , I_2 e I_3 . Para determinar sus valores, debo recoger como mínimo tres ecuaciones. Si las ecuaciones para el nodo A y B son prácticamente idénticas, puedo escribir un sistema que utilice solo tres de las ecuaciones que hemos escrito, y elijo estas:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_1 - I_2 + I_3 = 0 \\ V_1 - V_{R1} - V_2 = 0 \\ V_2 - V_{R2} + V_3 - V_{R3} = 0 \end{array} \right.$$

Utilizando la ley de Ohm, puedo volver a escribir las últimas dos ecuaciones sustituyendo la tensión en los extremos de las resistencias y haciendo que aparezcan las corrientes:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_1 - I_2 + I_3 = 0 \\ V_1 - I_1 R_1 - V_2 = 0 \\ V_2 - I_2 R_2 + V_3 - I_3 R_3 = 0 \end{array} \right.$$

Al resolver el sistema, obtengo los valores para I_1 , I_2 e I_3 y, por tanto, puedo conocer todas las magnitudes eléctricas dentro de mi circuito.

Saber generar las ecuaciones y desarrollar los cálculos es importante y no habría que perder nunca la práctica; sin embargo, en las tareas cotidianas o para tener una respuesta rápida y segura, es mejor confiar en un simulador de circuitos.

Teoremas de Thevenin y Norton

A veces puede que tengamos que enfrentarnos a un circuito muy complejo, tanto que requiera un elevado número de ecuaciones para su resolución (con Kirchhoff). El teorema de Thevenin nos puede ayudar a resolver estos casos intrincados siempre que el circuito que hay que examinar esté formado por resistores y generadores de tensión y de corriente. El concepto básico es considerar dos terminales del circuito y pensar que todo el circuito, por complejo que sea, se puede resumir en una especie de caja negra (*black box*) con dos simples terminales. Detrás de estos dos terminales encontramos simplemente una resistencia y un generador de tensión equivalentes que resumen el comportamiento de toda la red. Los terminales que elijamos son, obviamente, los que nos interesan, por ejemplo, un punto concreto acerca del cual deseamos conocer la tensión y la corriente presentes. A menudo estos dos puntos son los terminales de un componente presente. En este caso, tendremos que eliminar (ideal o realmente) el componente para obtener el equivalente de Thevenin del circuito existente. El teorema de Thevenin prevé dos fases:

1. en primer lugar se mide la tensión presente en los terminales del circuito;
2. en una segunda fase se eliminan los generadores y se sustituyen con circuitos abiertos o cortocircuitos, y se calcula la

resistencia equivalente.

Consideremos el circuito que se muestra en la [figura 1.18](#), formado por una red con varios generadores. El circuito no presenta realmente terminales y nos interesa medir tensión y corriente en los extremos de la resistencia R_x . Por esta razón, eliminamos la resistencia y la consideramos como una carga que conectaremos más tarde.

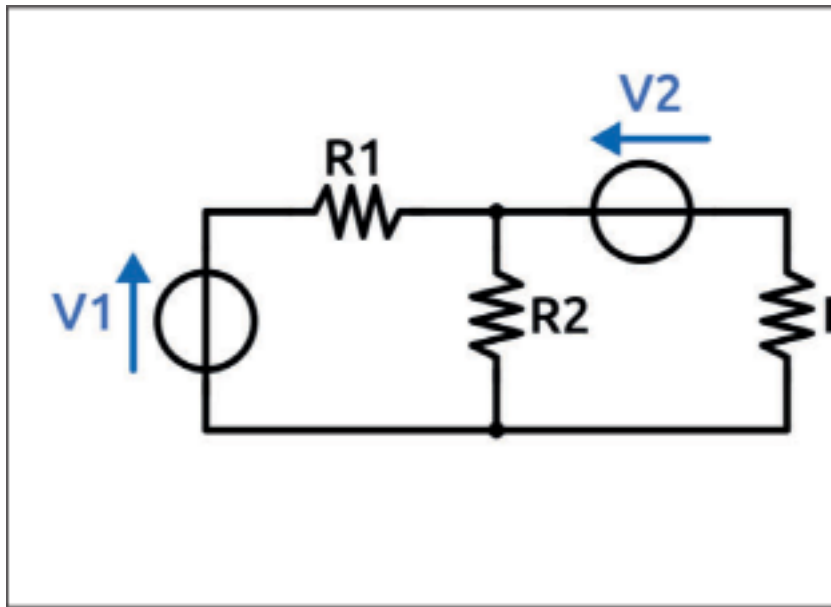


Figura 1.18 – Circuito de ejemplo para calcular el equivalente de Thevenin. A la derecha observamos el circuito al cual se ha eliminado la resistencia R_x .

Una vez eliminada la resistencia, hemos obtenido los dos

terminales, A y B ([figura 1.18](#)) a los cuales llega el resto de la red que consideramos como una caja negra. Como hemos dicho, para resolver el circuito en los terminales A-B previamente debemos extraer la tensión existente en los terminales. Podemos utilizar a Kirchhoff para obtener la tensión presente entre A y B.

La tensión entre A y B es la tensión equivalente de Thevenin. Pasemos a calcular la resistencia equivalente modificando el circuito de este modo:

- sustituyendo con un cortocircuito los generadores de tensión;
- eliminando los generadores de corriente (sustitución con circuito abierto).

Una vez hemos sustituido los generadores presentes, podemos calcular el valor de la resistencia equivalente de Thevenin, es decir, la resistencia visible en los terminales A y B.

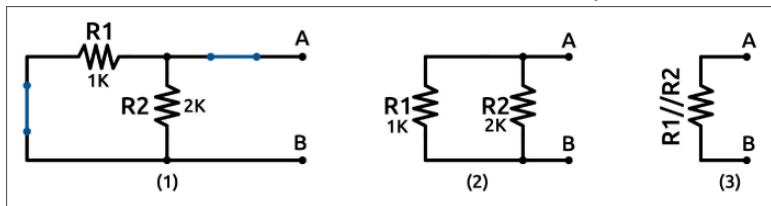


Figura 1.19 – El circuito modificado con los generadores de tensión cortocircuitados.

Ahora podemos dibujar el circuito equivalente de Thevenin formado por la resistencia R_{eq} en serie con el generador de tensión V_{eq} ([figura 1.20](#)).

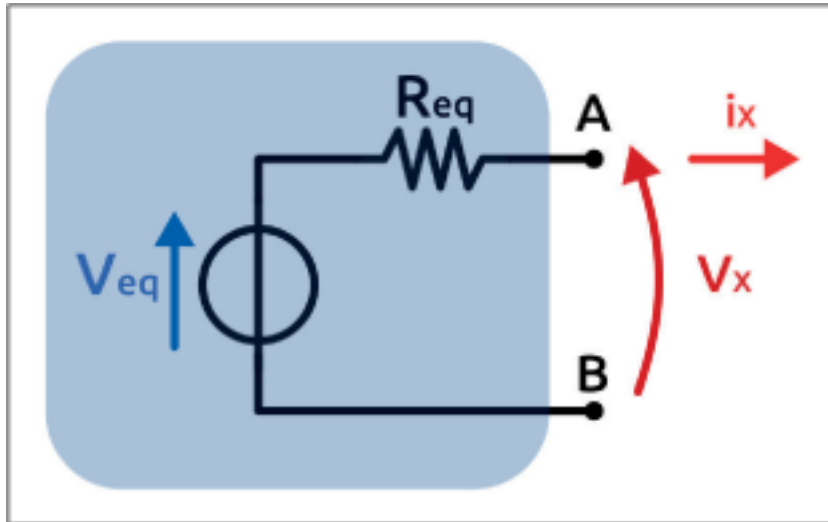


Figura 1.20 – El circuito equivalente de Thevenin al cual conectamos la R_x .

Al volver a conectar la resistencia R_x que hemos desconectado al inicio, podemos realizar los cálculos necesarios para determinar la corriente que pasa por ella y la tensión que medimos en sus extremos.

Existe una versión dual del teorema de Thevenin denominada teorema de Norton, según la cual, con un procedimiento idéntico al mostrado, es posible obtener una versión equivalente de un circuito formado por resistencias y generadores de tensión y corriente con un simple generador de corriente con una resistencia equivalente en paralelo. En este caso, es necesario identificar dos terminales y extraer la corriente que

se obtendría cortocircuitándolos. Después hay que determinar la resistencia equivalente que se puede calcular cortocircuitando los generadores de tensión y eliminando todos los generadores de corriente.

Funciones matemáticas y sinusoidales

En electrónica y electrotécnica a menudo se trabaja con conceptos matemáticos que pueden no ser demasiado sencillos. Para entender y estudiar algunos argumentos, se necesita algún conocimiento de análisis matemático y, por tanto, de algunos instrumentos que se explican normalmente en los últimos cursos de instituto o en la universidad.

No pretendo transmitir aquí todo el conocimiento matemático necesario para afrontar cálculos complejos de análisis, pero sí me gustaría darles algunos conceptos fundamentales para entender algunas de las fórmulas con que nos encontraremos. Todas las magnitudes electrónicas pueden ser expresadas con una regla que trata de explicar cómo se comportan. Normalmente, en matemáticas, estas reglas se conocen con el nombre de funciones, un concepto que la mayoría ya debieran conocer. Podemos imaginarnos una función como una caja mágica que toma un número a la entrada y proporciona un número a la salida. El número proporcionado a la entrada, también denominado variable de entrada, normalmente se indica con una x , mientras que el resultado se indica con la letra y .

Podemos indicar una función genérica así:

$$y = f(x)$$

Con este término no estamos diciendo mucho, solo que la variable y está determinada por una operación matemática

aplicada a la x . Estas operaciones genéricas se indican con la letra f .

Podemos ser más precisos y tratar de describir el comportamiento de la función añadiendo términos que trabajan sobre la variable x inmediatamente después del signo $=$. Este es un ejemplo de función matemática:

$$y = 12 \cdot x^2 + 10 \cdot x - 8$$

También podemos trazar sobre un gráfico la función para estudiar su tendencia. En electrónica, las funciones dependen a menudo del tiempo y de la frecuencia. Por tanto, encontraremos textos similares a este:

$$y = f(t)$$

donde la variable independiente es, esta vez, el tiempo (t), pasado como argumento a la función genérica f . La y se conoce como variable dependiente porque su valor depende de la t , que podemos elegir según nuestras preferencias.

A veces, las funciones expresan relaciones entre varias magnitudes eléctricas y, en lugar de x e y , podemos tener corrientes y tensiones. Por ejemplo, podríamos encontrar una función como esta:

$$I_D = f(V_{GS})$$

En este caso no debemos dejarnos desorientar por esta escritura menos familiar, sino simplemente tratar la V_{GS} como si fuera la x y la I_D como si fuera la y .

Una función muy concreta que se encuentra a menudo en electrónica es el seno (o el coseno).

Estas funciones tienen propiedades concretas que permiten trabajar con distintos tipos de señales con facilidad, tratándolos también desde el punto de vista matemático.

$$y = \sin(t)$$

Una senoide produce una señal regular y repetitiva que podemos dibujar en un gráfico.

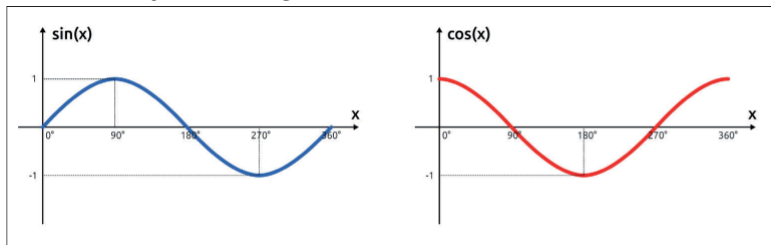


Figura 1.21 – El trazado del seno parte del origen y se repite subiendo y bajando de forma regular. El trazado del coseno empieza desde 1 y se repite oscilando regularmente.

La senoide parte del origen y, después, se repite subiendo y bajando hasta el infinito, pasando continuamente de 1 a -1. El coseno es igual, pero empieza desde el valor 0 para después oscilar entre 1 i -1.

El número x que pasamos a estas funciones se denomina también argumento y, en el caso de seno y coseno, es normalmente un valor angular que puede ser expresado en grados sexagesimales¹ o radianes.

Los radianes son un sistema distinto para indicar un ángulo.

Una aguja del reloj parte de 0° cuando señala las doce; después, mientras gira, llega a 90° cuando toca las 3, para llegar a 180° a las 6, 270° a las 9 y, después, 360° a las doce, para volver a empezar desde 0.

El ángulo completo, que equivale a 360° , se conoce también como ángulo perigonal. Podemos imaginar que el trazado de la senoide es como la aguja del reloj, que gira y, cuando esta realiza un giro entero del cuadrante, la onda realiza un trazado completo partiendo de 0 y pasando por 1 y -1, para, a continuación, desaparecer.

Los radianes son un modo alternativo para indicar los ángulos, preferido por los matemáticos, y van de 0 a 2π .² Por tanto, son un número que empieza en el 0 y llega a unos 6.28.

Tabla 1.2 – Correspondencia entre ángulos sexagesimales y en radianes.

Ángulo sexagesimal	Ángulo en radianes
0°	0
30°	$\pi/6$
45°	$\pi/4$
60°	$\pi/3$
90°	$\pi/2$
180°	π
270°	$3\pi/2$

Es posible convertir un ángulo en radianes en uno sexagesimal o viceversa, utilizando para ello una simple proporción:

$$\alpha : 360^\circ = \alpha_{rad} : 2\pi$$

Para obtener un ángulo en radianes a partir de uno sexagesimal, usaremos:

$$\alpha_{rad} = \frac{\alpha \cdot 2\pi}{360^\circ} = \alpha \cdot \frac{\pi}{180^\circ}$$

Para obtener un ángulo en grados sexagesimales a partir de uno en radianes:

$$\alpha = \frac{360^\circ \cdot \alpha_{rad}}{2\pi} = \alpha_{rad} \cdot \frac{180^\circ}{\pi}$$

Tiempos y frecuencias

El tiempo y la frecuencia son dos magnitudes fundamentales en el estudio de la electrónica. Tiempo y frecuencia están estrechamente vinculados, sobre todo cuando nos encontramos ante señales o eventos cíclicos (es decir, que se repiten en el tiempo). Si golpeamos una baqueta sobre un tambor cuatro veces en un segundo, estamos produciendo un sonido de cuatro hercios. Por tanto, los golpes están separados entre sí por un tiempo equivalente a:

$$t_b = \frac{1}{f_b} = \frac{1}{4 \text{ Hz}} = 0.25 \text{ s}$$

La fórmula para calcular la frecuencia es:

$$f = \frac{1}{T}$$

La letra T indica el periodo, es decir, la duración total de un evento que se repite. Para una corriente alterna, el periodo es el tiempo necesario para que la corriente realice un ciclo completo, partiendo de 0, llegando al máximo, bajando hasta el

valor mínimo y regresando a 0. Podemos hablar de periodo y, por tanto, de frecuencia para toda señal que se repite en el tiempo.

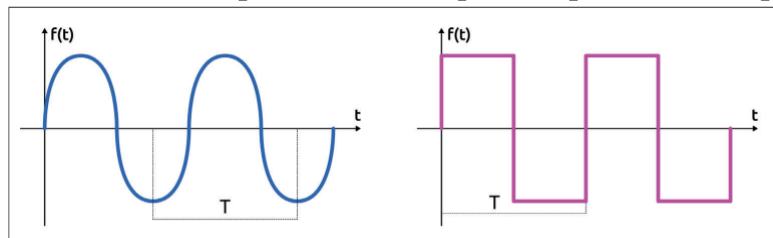


Figura 1.22 – El periodo es el tiempo necesario para realizar un ciclo completo.

Ya sabemos que a los electrónicos no les gustan demasiado los números con comas y ceros, y que son muy perezosos. ¡Por eso prefieren hablar de hercios (Hz) que de eventos que se comprueban cada 0.00000012 s!

Las corrientes continuas tienen una frecuencia igual a 0 Hz, por lo que nunca cambian.

Fasores

La fórmula del seno utilizada en electrónica depende normalmente del tiempo, pasado como parámetro. Por ejemplo, podemos expresar una tensión que cambia en el tiempo con una tendencia sinusoidal con un texto de este tipo:

$$v(t) = \sin(t)$$

Sin embargo, el trazado que obtenemos no es muy lógico porque faltan informaciones fundamentales para una señal sinusoidal. De hecho, no tenemos ningún control sobre su frecuencia, es decir, sobre el número de repeticiones por segundo, ni su amplitud. Habitualmente se prefiere escribir una señal sinusoidal con un texto como el siguiente:

$$v(t) = A \cdot \sin(2\pi ft + \varphi)$$

Esta expresión nos permite definir la amplitud de la señal que depende del valor de A. La senoide pura oscila entre 1 y -1, mientras que de esta manera podemos obtener una señal que va de A a -A. Si A fuera igual a 10, tendríamos una señal que pasa de 10 a -10 V. Entre paréntesis observamos un texto más complicado. Concentrémonos en la primera parte, que determina la frecuencia de oscilación de la onda. Para configurar la frecuencia de oscilación y utilizar el tiempo como variable, necesitamos el siguiente texto:

$$2\pi ft$$

La onda sinusoidal se repite de forma periódica tras un cierto

periodo de tiempo T. Este tiempo se denomina periodo de la onda y es exactamente el inverso de la frecuencia:

$$f = \frac{1}{T}$$

o bien:

$$T = \frac{1}{f}$$

$$\frac{2\pi}{T}$$

es una velocidad angular porque expresa en cuánto tiempo la senoide regresa al punto de partida, y puede expresarse en ángulos por segundo. Hemos visto que 2π es igual al ángulo perigonal, es decir, 360° , que dividimos por el periodo T de la onda. Al multiplicar esta velocidad angular por el tiempo t, puedo conocer en qué punto se encuentra mi senoide, si me imagino que está trazada por una aguja que gira dentro de un cuadrante de reloj.

El último parámetro de nuestra senoide es la fase (ϕ)³, necesaria en el caso en que se desee que la onda empiece en un

punto distinto a 0.

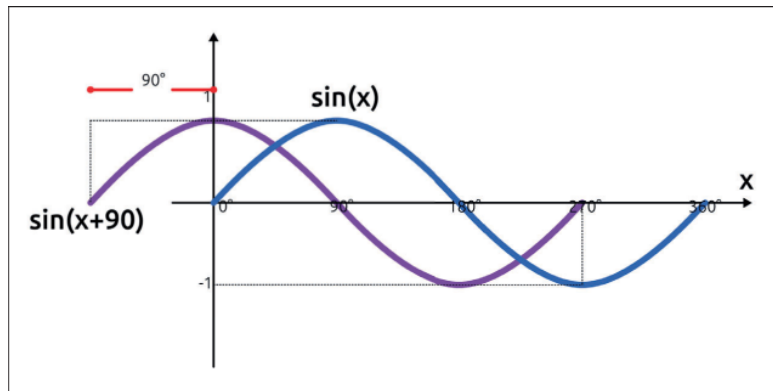


Figura 1.23 – Efecto de la fase sobre la senoide.

Cuando se estudian circuitos donde circulan corrientes sinusoidales, puede resultar cómodo utilizar una descripción alternativa y más práctica para realizar los cálculos en lugar de tratar directamente con las sinusoides. Al aplicar una señal a una determinada frecuencia a un circuito formado por componentes comunes (resistencias, inductancias, condensadores), todas las magnitudes eléctricas presentes cambiarán con la misma pulsación (a la misma frecuencia). En estos casos puedo simplificar las cosas y mantener solo lo indispensable. Considero una onda cosinusoidal (simplifico los cálculos a continuación):

$$v(t) = A \cdot \cos(2\pi ft + \varphi)$$

de la cual solo me ocupo de:

A, φ

porque la frecuencia será la misma para todo el circuito. Estos dos números expresan una amplitud y un ángulo y pueden dibujarlos sobre un gráfico. Estamos acostumbrados a utilizar gráficos cartesianos, donde las coordenadas se indican sobre dos ejes perpendiculares entre sí. Un modo alternativo de indicar un punto es mediante las coordenadas polares, que especifican, en lugar de la x y la y , la distancia del punto de partida y el ángulo de inclinación respecto a un eje de referencia.

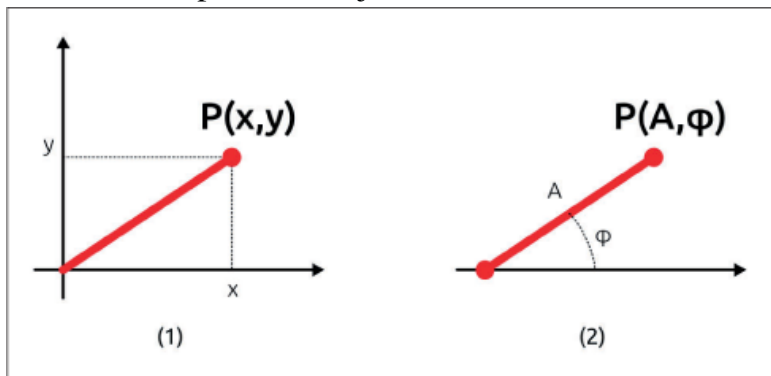


Figura 1.24 – Coordenadas rectangulares (1) y polares (2).

Obviamente, siempre se puede pasar de un sistema de coordenadas al otro mediante algún cálculo (necesitarán una calculadora científica, un seno y un coseno). Por ahora no necesitamos realizar ningún paso de coordenadas, por lo que seguiremos adelante... Sabemos indicar las coordenadas de un punto en el plano cartesiano y podemos hacerlo escribiendo, por

ejemplo, las coordenadas entre paréntesis, separadas por comas:

$$P = (a, b)$$

Con las coordenadas polares, podemos hacer algo parecido a esto:

$$P = (A, \varphi)$$

Los primeros matemáticos e ingenieros que estudiaron estas señales prefirieron utilizar una versión mucho más elegante que el simple espacio cartesiano formado por dos coordenadas, x e y, y adoptaron aquello que se conoce como números complejos (o imaginarios), que permiten combinar x e y en un único número (disculpen la definición poco precisa y algo folclórica). Así, podemos indicar el mismo punto P de esta forma:

$$P = a + jb$$

La j que vemos antes de la b es la unidad imaginaria que, a veces, también se indica con una i. Podemos dibujar en un gráfico cartesiano este número como si fuera un punto común con una abscisa (la x) que equivale a la a, y una ordenada (la y) que equivale a la b. Podemos transformar un número imaginario en su representación polar. Tampoco en este caso tendremos dos números desvinculados, sino que podemos escribir el conjunto de un modo más compacto:

$$P = A \cdot e^{j\varphi}$$

A es igual a la longitud del segmento que une el origen con el punto, mientras que φ es la inclinación del segmento respecto al eje horizontal.

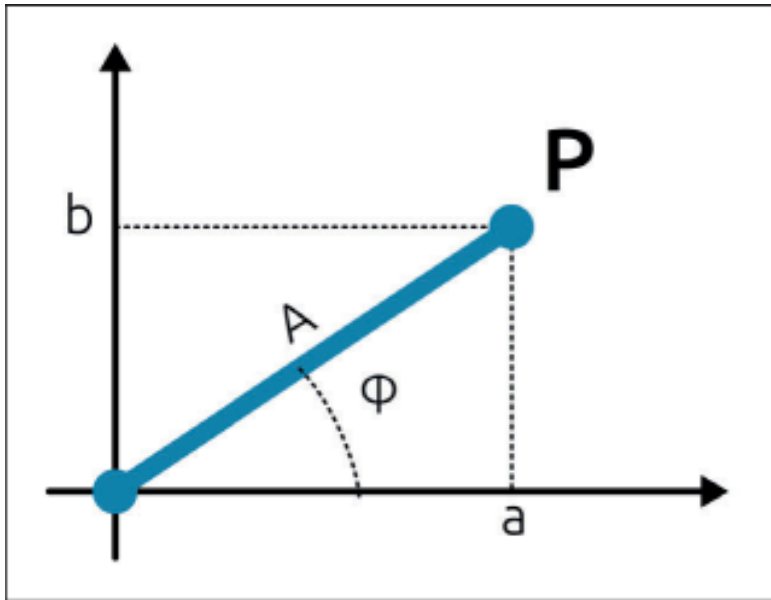


Figura 1.25 – El punto P representado en el plano imaginario, en coordenadas cartesianas y polares.

Hemos partido de una senoide para llegar a una representación suya concreta que tiene en cuenta solo sus componentes fundamentales: amplitud y fase.

Por lo tanto, podemos decir que:

$$A \cdot \cos(2\pi ft + \varphi)$$

equivale a:

$$A \cdot e^{j\varphi}$$

Esta última representación se puede denominar **faseor** y,

cuando se trata con las corrientes alternas, simplifica mucho los cálculos. Además, puedo pasar de una senoide de forma clásica a un fasor, y viceversa. Sin embargo, a la práctica, cuando se trabaja con fasores, no se tiene en cuenta la amplitud original de la onda sinusoidal, sino que se divide su valor por la raíz cuadrada de 2, porque así se trabaja con el valor efectivo de la senoide. El valor efectivo se puede definir para cada magnitud periódica y está relacionado con los valores medios. Si consideramos una senoide y la observamos durante un periodo de tiempo, esta tendrá una zona toda positiva y una, idéntica, negativa. Su valor medio es, por tanto, igual a 0, porque la onda es durante tanto tiempo positiva como negativa. Podría parecer que una onda sinusoidal no sea capaz de combinar nada si, al final, tiene un valor medio igual a 0.

Sabemos muy bien que esto no es así, puesto que, si no, en nuestras casas no tendríamos corriente alterna. Por esta razón se utiliza el valor eficaz o RMS (*Root Mean Square*), que es igual al valor de la corriente continua que produciría la misma disipación de potencia (media) sobre una carga resistiva. Para calcular el valor eficaz de una onda sinusoidal, se necesita calcular el área de la senoide al cuadrado, dividida por su periodo, y todo ello bajo una raíz cuadrada. El cálculo proporciona un resultado muy sencillo y familiar para todos los electrónicos:

$$V_{eff} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}}$$

Operaciones sobre fasores

Hemos definido un fasor y hemos aprendido que corresponde a una representación cómoda para una senoide. Cuando utilizamos fasores, debemos basarnos en estas reglas.

Producto de un fasor por una constante

Una tensión sinusoidal $s_1(t)$ corresponde a un fasor A_1 . Si multiplico (o amplifico) la senoide $s_1(t)$ por n veces, obtengo que también la amplitud del fasor se amplificará con la misma magnitud y será igual a:

$$n \cdot \sin(t) \rightarrow n \cdot \overrightarrow{A_1}$$

Suma de fasores

Si tengo dos magnitudes sinusoidales s_1 y s_2 , puedo sumarlas y obtener:

$$S_3(t) = S_1(t) + S_2(t)$$

La suma no cambia si utilizamos los fasores:

$$\overrightarrow{A_3} = \overrightarrow{A_1} + \overrightarrow{A_2}$$

Derivada de un fasor

En las fórmulas electrónicas, a menudo hay que tener en cuenta la variación de la señal. Si tengo $s_1(t)$, me podría interesar conocer la rapidez con que cambia la señal en el tiempo, lo que equivale a saber la pendiente de la curva. En muchas fórmulas electrónicas, es necesario calcular este tipo de variaciones. Por ejemplo, al estudiar los condensadores observamos que la corriente que pasa por ellos es proporcional a la variación en el tiempo de la tensión en las placas. La variación de la tensión en el tiempo es comparable a la pendiente de la curva. Cuando queremos medir la pendiente de una calle, medimos cuánto sube y a lo largo de qué distancia. Con las dos medidas podemos determinar la pendiente, que, por último, se puede expresar como porcentaje. Cuando, mientras conducimos, nos encontramos con un cartel que indica que la pendiente de la carretera es del 10 %, significa que la carretera subirá como mínimo 10 m por cada 100 m que recorramos.



Figura 1.26 – Cartel que indica una pendiente del 10 % y grafía para el cálculo de la pendiente.

Para medir la pendiente, debemos medir dos intervalos, uno a lo largo del eje x y otro a lo largo del eje y. Estos intervalos también se conocen como delta y se escriben así:

$$\Delta_t = t_2 - t_1$$

Imaginemos que tomamos un intervalo muy pequeño, y reducimos al máximo la distancia de los dos puntos. Supongamos que llevamos esta distancia prácticamente hasta 0. En matemáticas, esta operación equivale a calcular el límite, llevar la distancia entre dos puntos de forma ideal hasta 0. En esta condición cambia también la manera de escribir la delta, que es prácticamente infinitesimal. Así, escribiremos lo siguiente:

dt

Para indicar que estamos derivando una función respecto a

una de sus variables, por ejemplo, una función que dependa del tiempo t , escribiremos:

$$\frac{df}{dt}$$

Para calcular la derivada de una función cualquiera, se necesitan algunos conocimientos de análisis matemático. El procedimiento no es complicado, aunque es preciso recordar algunas reglas sencillas que podemos consultar en un libro de matemáticas. Por ahora basta con haber comprendido (o recordado) que la derivada de una función equivale a calcular una nueva función que representa la pendiente de la función de partida punto por punto.

Volviendo a las sinusoides y los fasores, si tenemos una senoide:

$$s_1(t) = A \cdot \cos(2\pi ft + \varphi)$$

o:

$$s_1(t) = A \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

utilizando:

$$2\pi f = \omega$$

y queremos calcular su derivada:

$$s_2(t) = \frac{d}{dt} s_1(t) = -\omega \cdot A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

observamos que, pasando a los fasores, obtenemos:

$$\overrightarrow{A_2} = j\omega \overrightarrow{A_1}$$

Si tenemos en cuenta que los fasores se caracterizan por una distancia y un ángulo, se pueden trazar gráficamente. El resultado que hemos obtenido corresponde a rotar el fasor 90° . Esta información nos servirá más adelante, cuando apliquemos la senoide a componentes electrónicos como condensadores e inductancias.

Ley de Ohm en corriente alterna

La ley de Ohm se aplica también en circuitos alimentados con corriente alterna. Podemos imaginar que tenemos un generador que produce una tensión alterna y lo aplicamos a una resistencia R con un simple circuito, como el que se muestra en la [figura 1.27](#).

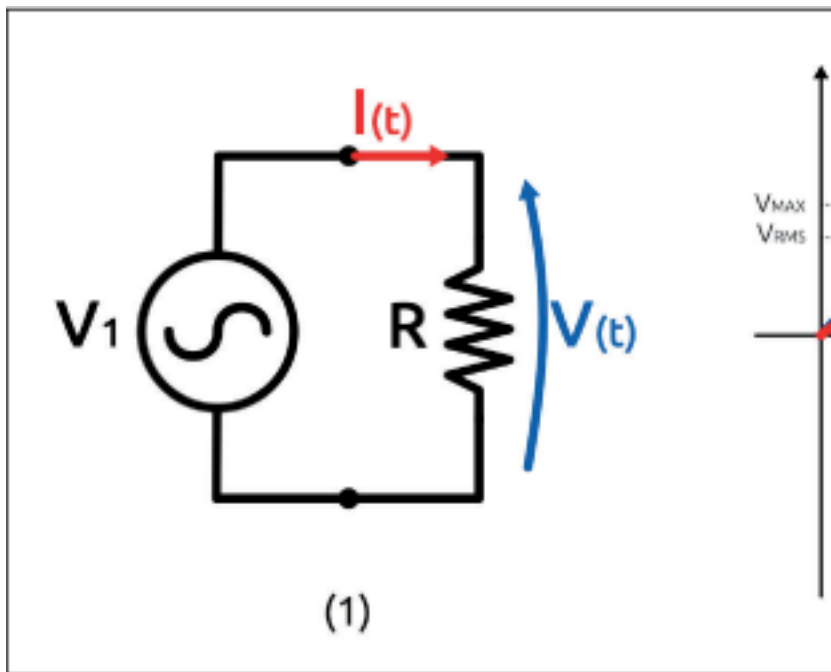


Figura 1.27 – Generador sinusoidal conectado a una

resistencia R.

La señal utilizada será:

$$V_1(t) = V \cdot \cos(2\pi ft)$$

La corriente que circula en el circuito se puede determinar simplemente con la ley de Ohm:

$$I(t) = \frac{V(t)}{R} = \frac{V \cdot \cos(2\pi ft)}{R} = \frac{V}{R} \cdot \cos(2\pi ft)$$

Podemos observar que tanto la expresión de la tensión como la de la corriente tienen la misma forma, ambas son cosenos, con la misma frecuencia. Por tanto, tenemos dos ondas simples sincronizadas, es decir, en fase entre ellas. La resistencia no modifica la señal sinusoidal y no presenta desfases. También podemos escribir las ecuaciones mediante los fasores. La ley de Ohm adopta esta forma:

$$\vec{I} = \frac{\vec{V}_1}{R}$$

donde $\vec{V}$ e $\vec{I}$ son los fasores que corresponden a $V_1(t)$ e $I(t)$.

Condensadores en corriente alterna

Un condensador es un componente electrónico muy sencillo que se crea acercando dos superficies metálicas denominadas placas. Estas placas están conectadas a los dos terminales. Si se conecta una batería a los dos terminales, no pasará la corriente, solo de forma momentánea. De hecho, el condensador permite el paso solo de corrientes variables en el tiempo, mientras bloquea las continuas.

Cuando aplicamos una tensión continua, sobre las dos superficies se forma una distribución de cargas eléctricas, positivas sobre una placa y negativas sobre la otra. Esta distribución de cargas origina un campo eléctrico estable una vez que la corriente se está ejecutando. La corriente que detectamos en la fase de carga es una corriente aparente, por el hecho de que las armaduras se están cargando y, por tanto, es como si absorbieran cargas eléctricas, con lo que da así la impresión de que circula algo de corriente en el circuito (*displacement current*). La cantidad de carga presente en las placas de un condensador es proporcional a la diferencia de potencial aplicada. La constante que indica esta proporción se denomina capacidad y se indica con la letra C.

$$Q = C \cdot V$$

La capacidad es una magnitud similar a la resistencia: de hecho, caracteriza el condensador e indica su capacidad de

almacenar cargas eléctricas. Además, es un número siempre positivo. La capacidad de un condensador se mide en faradios y en submúltiplos de faradio.

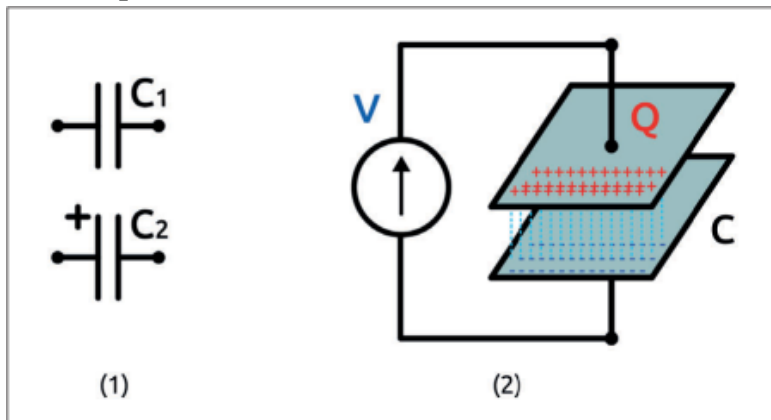


Figura 1.28 – Símbolos de condensadores, polarizados y no, y representación gráfica de las placas cargadas.

Hemos podido ver al inicio de este capítulo que la corriente puede describirse como la variación de carga en el tiempo. En la primera expresión hemos utilizado las deltas. Obviamente, la fórmula se puede escribir como una derivada y, por tanto, será:

$$i = \frac{dQ}{dt}$$

Recordemos que esta expresión significa que nos interesa conocer la tendencia de las variaciones de carga en el tiempo. Tratemos de aplicar la derivada en la ecuación que describe la relación entre carga y tensión sobre un condensador ($Q = CV$):

$$\frac{dQ}{dt} = C \cdot \frac{dV}{dt}$$

El primer término es, precisamente, la corriente, por lo que, si realizamos la sustitución, tenemos:

$$i = C \cdot \frac{dV}{dt}$$

También podemos analizar la fórmula con fasores. Supongamos que aplicamos una tensión sinusoidal al condensador:

$$V(t) = V \cdot \cos(2\pi ft + \varphi)$$

El fasor correspondiente será $\vec{V}$ y lo aplicaremos a la fórmula para la corriente:

$$\vec{I} = j \cdot 2\pi f \cdot C \cdot \vec{V}$$

La fórmula me dice que el fasor $\vec{V}$, aplicado al condensador, producirá el fasor $\vec{I}$, desfasado 90° . También podemos comprobar esta propiedad de los condensadores dibujando en un gráfico el progreso de $V(t)$ e intentando calcular gráficamente su derivada. Como ya hemos dicho, la derivada es igual a la pendiente de la curva punto por punto. La función $\sin(t)$ parte en el punto de origen de los ejes con una inclinación de 45° . El valor de su derivada y de la pendiente será igual a 1.

Cuando $\sin(t)$ está a 90° , se encuentra en su punto máximo de altura y se prepara para bajar: la pendiente es igual a 0.

A 180° $\sin(t)$ va de bajada y pasa por el eje horizontal a 45° , por lo que su pendiente será de -1 .

A 270° su pendiente es aún de 0 para, a continuación, volver, a 360° , a 1.

Si dibujamos la curva de las pendientes, hemos obtenido la tendencia de $i(t)$ y podemos observar que la corriente tiene un desfase de 90° (de antemano) respecto a la tensión.

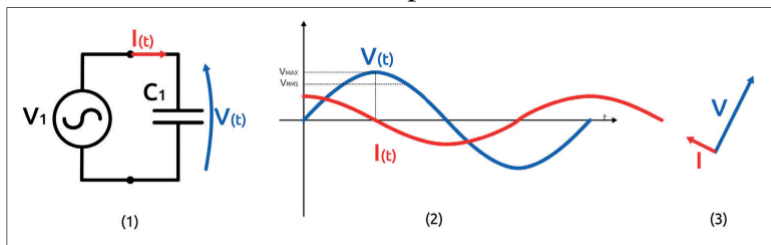


Figura 1.29 – Tendencia de una tensión sinusoidal aplicada a un condensador.

La tensión aplicada cambia continuamente, por lo que en el condensador circulará una corriente y este podría comportarse de forma similar a un resistor. A diferencia de un resistor, un condensador no disipa energía, sino que actúa desfasando entre ellos la tensión y la corriente aplicadas. Este comportamiento se asemeja al de una resistencia, pero, como hemos visto, tiene como efecto el de desfasar ambos componentes. Así, podemos describirlo como una relación entre tensión y corriente que se llama reactancia y se mide en ohmios. Normalmente la reactancia se representa con la letra X . La reactancia del condensador es igual a:

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

La reactancia depende de la frecuencia y, cuando esta es muy elevada, tendremos un valor muy bajo que subirá a medida que la frecuencia disminuye. Cuando la frecuencia es igual a 0, el valor de inductancia es infinito. Por esta razón, los condensadores dejan pasar las señales variables, pero no las continuas.

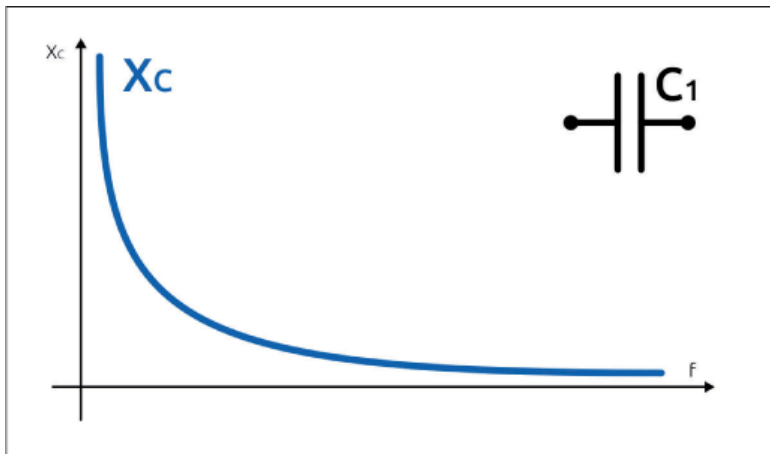


Figura 1.30 – Tendencia de la reactancia de un condensador al cambiar la frecuencia de la señal aplicada.

Inductores en corriente alterna

Un inductor es un componente eléctrico cuyo comportamiento es opuesto al de un condensador. Los inductores también tienen una estructura muy simple. De hecho, se hacen enrollando un cable eléctrico varias veces hasta obtener una bobina formada por múltiples espiras situadas unas junto a otras. Mientras que los condensadores utilizan un campo eléctrico, los inductores deben sus propiedades al campo electromagnético que se establece entre las espiras alimentadas por una corriente. Si conectamos una batería a los dos terminales, conseguimos un paso de corriente. Sin embargo, si la corriente aplicada cambia en el tiempo, observaremos cierta oposición al paso de las cargas a medida que va aumentando la frecuencia. Un inductor bloquea las corrientes variables y deja pasar, en cambio, las corrientes continuas. Si aplicamos una corriente al componente, entre las espiras se establece un campo magnético que obstaculiza las variaciones de corriente. El campo magnético que se forma depende de las características de la bobina: número de espiras, longitud, diámetro del bobinado. La tensión en los extremos de un inductor depende de las variaciones de la corriente y, por tanto, podemos escribir:

$$V = L \cdot \frac{dI}{dt}$$

La tensión en los extremos del inductor está vinculada a los cambios de corriente mediante el valor de inductancia (L). La inductancia se mide en henrios y submúltiplos de henrios. La inductancia es una magnitud similar a la resistencia; de hecho, caracteriza al inductor e indica su capacidad de almacenar energía electromagnética. L siempre es un número positivo.

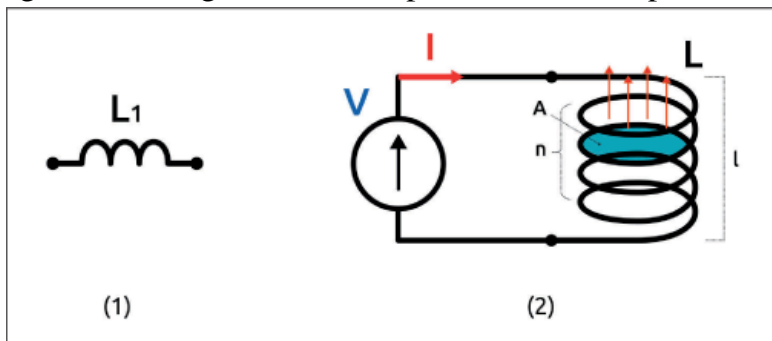


Figura 1.31 – Símbolo de un inductor y representación gráfica de la bobina con el campo eléctrico.

Podemos volver a escribir la fórmula de la inductancia con fasores: imaginemos que aplicamos una corriente sinusoidal al inductor:

$$I(t) = I \cdot \cos(2\pi ft + \varphi)$$

El fasor correspondiente será $\vec{I}$ y lo aplicaremos a la fórmula para la tensión:

$$\vec{V} = j \cdot 2\pi f \cdot L \cdot \vec{I}$$

La fórmula me revela que el fasor $\vec{I}$, aplicado al inductor, producirá el fasor $\vec{V}$, con un desfase de 90° . Otra forma de observar esta propiedad de los inductores es dibujando sobre un gráfico la tendencia de $I(t)$ y tratando de calcular gráficamente su derivada, como hemos hecho para el condensador. Podemos observar que la curva de la tensión se desfasa 90° (con retraso) respecto a la corriente.

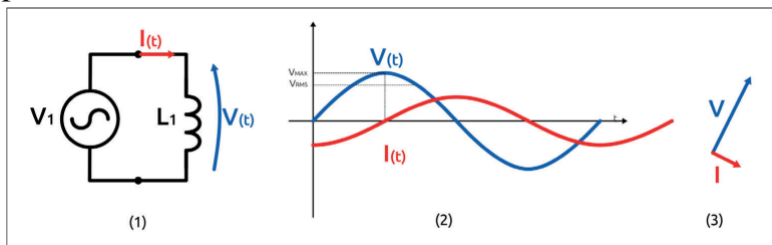


Figura 1.32 – Tendencia de una corriente sinusoidal aplicada a un inductor.

La tensión aplicada varía continuamente y, por tanto, por el inductor pasará una corriente que tendrá dificultades en circular, porque este se comporta de forma similar a un resistor. A diferencia de un resistor, un inductor no disipa energía, sino que actúa desfasando entre ellos la tensión y la corriente aplicadas. Este comportamiento se asemeja al de una resistencia, pero, como hemos visto, tiene como efecto desfasar ambos componentes. Por esta razón, podemos describirlo como una relación entre tensión y corriente que se llama reactancia y se mide en ohmios. Normalmente la reactancia se representa con la letra X. La reactancia del inductor es igual a:

$$X_L = 2\pi fL$$

La reactancia depende directamente de la frecuencia: al aumentar el valor de una, también aumentará el de la otra, que será 0 cuando existe corriente continua. Por esta razón, los inductores dejan pasar las señales continuas y obstaculizan las variables.

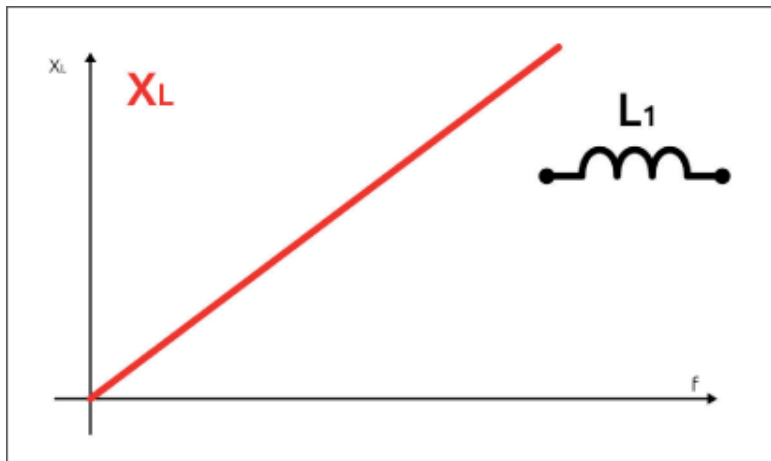


Figura 1.33 – Tendencia de la reactancia de un inductor cuando varía la frecuencia de la señal aplicada.

Impedancia

Cuando una corriente alterna circula por un circuito eléctrico, puede sufrir cierta resistencia a su flujo, como ocurre en una corriente continua. En estos casos, no hablamos simplemente de resistencia, sino de impedancia (Z), que siempre se mide en ohmios y es un número complejo. Esto significa que está formado por dos componentes, como si fuera una especie de coordenada.

A diferencia del caso continuo, donde solo los resistores se oponen al paso de la corriente, en la corriente alterna o variable también pueden influir otros dipolos. Como ya hemos visto, condensadores e inductancias tienen un comportamiento que varía con la frecuencia de la señal. En concreto, ofrecen una resistencia mayor o menor según la frecuencia que los atraviesa. Estos dipolos, además de ofrecer resistencia al paso de la corriente, también actúan modificando la fase entre los componentes de tensión y corriente. La impedancia es, por tanto, una generalización de la ley de Ohm, y podemos expresarla como una relación entre el componente de tensión y corriente (expresadas como fasores):

$$\vec{Z} = \frac{\vec{V}}{\vec{I}}$$

Como ya hemos visto, un fasor es un número complejo, es decir, un número formado por dos componentes que pueden ser trazados sobre dos dimensiones. Así, la impedancia puede expresarse de este modo:

$$Z = R + jX$$

El componente horizontal R es igual a una resistencia auténtica, mientras que el componente X, situado sobre el eje vertical, se denomina reactancia y se debe a la presencia de bobinas y condensadores.

A veces también se habla de admitancia, que no es más que lo contrario de la impedancia y se expresa con la letra Y:

$$Y = \frac{1}{Z}$$

Podemos crear circuitos formados por dipolos caracterizados por un valor de impedancia que depende de la frecuencia a la cual trabaja el circuito. Los dipolos pueden ser combinados en serie o en paralelo, como ocurre con una simple resistencia. En

el caso de los dipolos en serie, la impedancia resultante será igual a la suma de las impedancias de cada uno de los componentes:

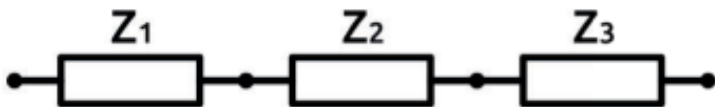
$$Z_{tot} = Z_1 + Z_2 + Z_3 + \dots = \sum_{i=1}^N Z_i$$

Varios dipolos en paralelo tienen una admitancia equivalente a la suma de las admitancias de cada uno de los dipolos:

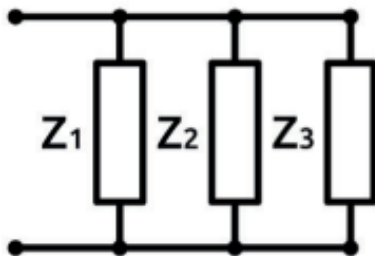
$$Y_{tot} = Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots = \sum_{i=1}^N Y_i$$

Podemos volver a escribir el conjunto de un modo más familiar, diciendo que el inverso de la impedancia de varios dipolos es igual a la suma de los inversos de cada una de las impedancias:

$$\frac{1}{Z_{tot}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \dots = \sum_{i=1}^N \frac{1}{Z_i}$$



(1)



(2)

Figura 1.34 – Dipolos en serie (1) y en paralelo (2).

Potencia en los circuitos en corriente alterna

La fórmula para el cálculo de la potencia que hemos visto anteriormente no funciona para un circuito que contenga condensadores e inductores. Como ya hemos comprobado, estos componentes pueden almacenar energía que luego liberan y la energía proporcionada al circuito es en parte absorbida y en parte disipada (si existen componentes resistivos). Así, las cosas se van complicando y se habla de **potencia aparente**, que se calcula de forma muy parecida, aunque tenga, como ya hemos visto, un significado distinto.

$$VA = V_{eff} \cdot I_{eff}$$

En lugar de expresarla con la letra P, se utiliza la sigla VA y no se mide en vatios, porque no tendría mucho sentido, sino en VA (voltiamperios).

Imaginemos que tenemos un circuito formado por un generador de tensión sinusoidal conectado a una impedancia. El generador tiene una tensión efectiva que indicamos mediante V_{eff} o V_{RMS} , que es igual a la tensión de pico dividida por la raíz cuadrada de 2. Estamos acostumbrados a expresar la tensión alterna utilizando su valor eficaz. Por ejemplo, sabemos que la tensión de red que llega a nuestras casas tiene un valor de 230 V, que equivale a la tensión efectiva (o RMS), mientras que su

valor de pico es de unos 325 V.

Podemos expresar la impedancia conectada al generador con un número complejo Z :

$$Z = R + jX$$

Este número tiene un componente R , denominado real, que corresponde a los componentes resistivos presentes en el circuito, y un componente X , denominado reactivo, que tiene en cuenta los efectos energéticos imputables a bobinas y condensadores presentes dentro del circuito. Los componentes resistivos dispensan una **potencia real** y expresada en vatios:

$$P_R = I_{eff}^2 \cdot R$$

Para los componentes reactivos hablaremos de **potencia reactiva**, que se expresará con el término VAR y se medirá en VA (voltiamperios):

$$VAR = I_{eff}^2 \cdot X$$

Se nos podría ocurrir sumar las dos potencias para obtener la potencia aparente, pero estaríamos cometiendo un error:

$$P_R + VAR \neq VA$$

Debemos tener en cuenta la fase que tienen los distintos componentes para poder combinarlos de manera correcta.

Otro parámetro importante que podemos encontrar en este tipo de circuitos es el **factor de potencia** (*power factor*), con el cual se indica el equilibrio o desequilibrio de las potencias reactivas en un circuito. La expresión es muy sencilla y se expresa normalmente como porcentaje:

$$PF = \frac{P_R}{VA}$$

En el numerador podemos ver la potencia resistiva, mientras que en el denominador tenemos la potencia aparente.

Decibelios

Los decibelios se utilizan para indicar fácilmente la relación entre dos magnitudes que pueden ser muy distintas. Según el tipo de magnitudes que se están comparando, se utilizan dos fórmulas distintas: una para comparar magnitudes como simples tensiones y otra para comparar potencias. Para ejecutar el cálculo se debe utilizar un logaritmo de base diez: sin profundizar en ello, pueden encontrar la función en una calculadora científica o en una hoja de cálculo. El logaritmo es un operador que simplifica los números y ayuda en las comparaciones cuando estamos comparando números muy grandes con números muy pequeños. La fórmula para las tensiones es:

$$dB = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

La fórmula para las potencias es:

$$dB = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

El logaritmo tiene un comportamiento particular. De hecho, si la relación entre las tensiones es mayor que 1, los decibelios tienen el signo más; si la relación es igual a 1, tendremos 0 decibelios, y para las relaciones menores de 1, tendremos decibelios negativos.

¹ El sistema sexagesimal para medir la amplitud de los ángulos parte de 0° y llega hasta 360°.

² La letra griega π (PI) se utiliza para indicar una constante matemática igual a aproximadamente 3.14.

³ Letra griega fi.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.