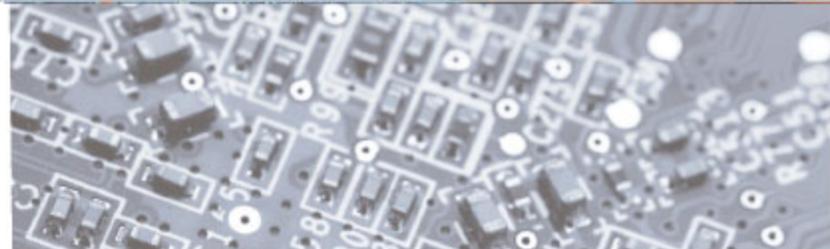
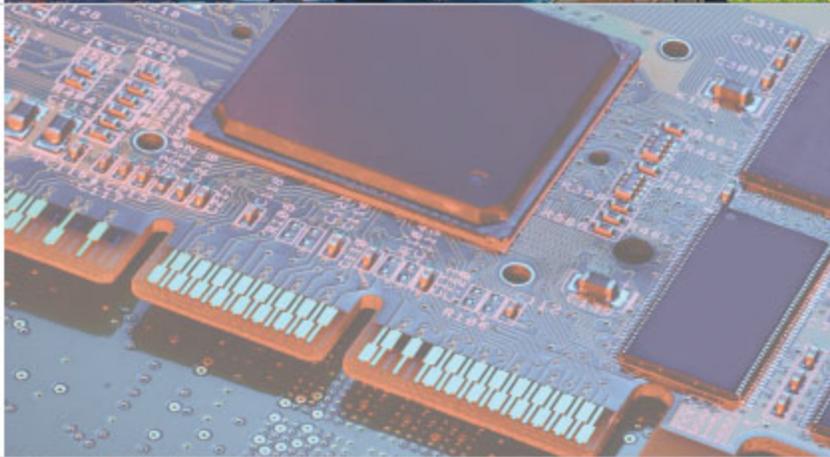
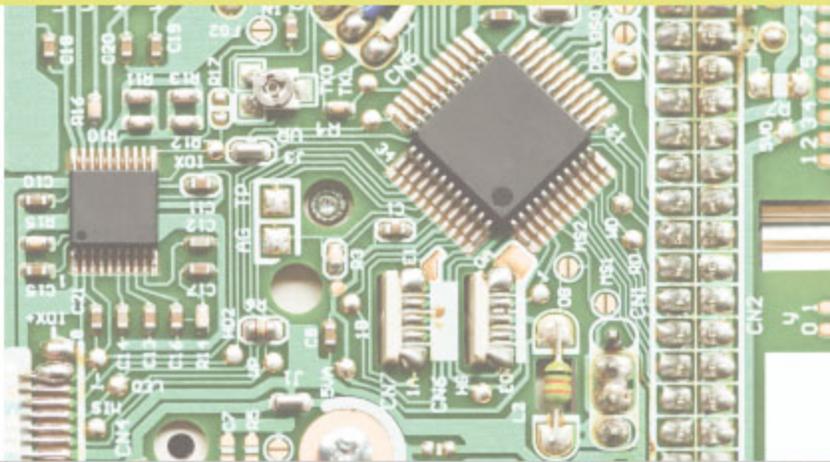


Apoyo en la



RICHARD C. DORF
JAMES A. SVOBODA

Novena edición



 **Alfaomega**

Circuitos Eléctricos

NOVENA EDICIÓN



Circuitos Eléctricos

James A. Svoboda

Universidad Clarkson

Richard C. Dorf

Universidad de California



Buenos Aires • Bogotá • México DF • Santiago de Chile

Director editorial:

Marcelo Grillo Giannetto
mgrillo@alfaomega.com.mx

Jefe de ediciones

Francisco Javier Rodríguez Cruz
jrodriguez@alfaomega.com.mx

Al cuidado de la edición:

Luz Ángeles Lomelí Díaz
lalomeli@alfaomega.com.mx

Datos catalográficos

Dorf, Richard y Svoboda, James
Circuitos Eléctricos
Novena Edición

Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México

ISBN: 978-607-622-362-8

Formato: 20.5 x 25 cm

Páginas: 920

Circuitos Eléctricos

Richard C. Dorf y James A. Svoboda

ISBN: 978-1-118-47750-2 edición original en inglés "Introduction to Electric Circuits", 9th Edition, publicada por John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, USA.

Derechos reservados © 2014 John Wiley & Sons, Inc.

Novena edición: Alfaomega Grupo Editor, México, mayo 2015

© 2015 Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.

Pitágoras 1139, Col. Del Valle, 03100, México D.F.

Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana
Registro No. 2317

Pág. Web: <http://www.alfaomega.com.mx>

E-mail: atencionalcliente@alfaomega.com.mx

ISBN: 978-607-622-362-8

Derechos reservados:

Esta obra es propiedad intelectual de su autor y los derechos de publicación en lengua española han sido legalmente transferidos al editor. Prohibida su reproducción parcial o total por cualquier medio sin permiso por escrito del propietario de los derechos del copyright.

Nota importante:

La información contenida en esta obra tiene un fin exclusivamente didáctico y, por lo tanto, no está previsto su aprovechamiento a nivel profesional o industrial. Las indicaciones técnicas y programas incluidos, han sido elaborados con gran cuidado por el autor y reproducidos bajo estrictas normas de control. ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, S.A. de C.V. no será jurídicamente responsable por: errores u omisiones; daños y perjuicios que se pudieran atribuir al uso de la información comprendida en este libro, ni por la utilización indebida que pudiera dársele.

Edición autorizada para venta en todo el mundo.

Impreso en México. Printed in Mexico.

Empresas del grupo:

México: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. – Pitágoras 1139, Col. Del Valle, México, D.F. – C.P. 03100.
Tel.: (52-55) 5575-5022 – Fax: (52-55) 5575-2420 / 2490. Sin costo: 01-800-020-4396
E-mail: atencionalcliente@alfaomega.com.mx

Colombia: Alfaomega Colombiana S.A. – Calle 62 No. 20-46, Barrio San Luis, Bogotá, Colombia,
Tels.: (57-1) 746 0102 / 210 0415 – E-mail: cliente@alfaomega.com.co

Chile: Alfaomega Grupo Editor, S.A. – Av. Providencia 1443. Oficina 24, Santiago, Chile
Tel.: (56-2) 2235-4248 – Fax: (56-2) 2235-5786 – E-mail: agechile@alfaomega.cl

Argentina: Alfaomega Grupo Editor Argentino, S.A. – Paraguay 1307 P.B. Of. 11, C.P. 1057, Buenos Aires, Argentina, – Tel./Fax: (54-11) 4811-0887 y 4811 7183 – E-mail: ventas@alfaomegaeditor.com.ar

La naturaleza científica del hombre común
es salir y hacer lo mejor que pueda.

—John Prine

Pero capitán, yo no puedo cambiar las leyes de la física.
—Teniente Comodoro, Montgomery Scott (Scotty), del USS *Enterprise*

Dedicado a nuestros nietos:

Ian Christopher Boilard, Kyle Everett Schafer y Graham Henry Schafer

y

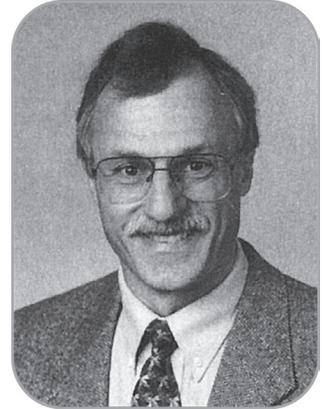
Heather Lynn Svoboda, James Hugh Svoboda, Jacob Arthur Leis,
Maxwell Andrew Leis y Jack Mandlin Leffler

Los autores

James A. Svoboda es profesor adjunto de ingeniería eléctrica y computacional en la Universidad Clarkson, donde da cursos sobre temas de circuitos, electrónica y programación computacional. Obtuvo su doctorado en Ingeniería Eléctrica por la Universidad de Wisconsin en Madison, una maestría por la Universidad de Colorado y una licenciatura en Ciencias del General Motors Institute.

Circuitos para segundo año es uno de los cursos favoritos del profesor Svoboda. Ha dado este curso a 6,500 estudiantes universitarios en la Universidad Clarkson durante los últimos 35 años. En 1986 recibió el Distinguished Teaching Award de la Universidad Clarkson.

El profesor Svoboda ha escrito varios artículos en los cuales describe las ventajas de utilizar nulificadores (*nullors*) para modelar circuitos eléctricos en análisis por computadora. Le interesa la manera en que la tecnología afecta la formación en ingeniería y ha desarrollado algunos paquetes de software para su uso en los Circuitos para segundo año.



Richard C. Dorf, profesor de Ingeniería Eléctrica y Computacional en la Universidad de California, Davis, da cursos a graduados y estudiantes universitarios de Ingeniería Eléctrica en los campos de circuitos y sistemas de control. Obtuvo su doctorado en Ingeniería Eléctrica por la U.S. Naval Postgraduate School, una maestría por la Universidad de Colorado y una Licenciatura en Ciencias por la Universidad Clarkson. Profundamente comprometido con la materia de la ingeniería eléctrica y su gran valor para los menesteres sociales y económicos, ha escrito y disertado a nivel internacional sobre la contribución y avances de la ingeniería eléctrica.

El profesor Dorf tiene una vasta experiencia a nivel educacional e industrial y está activo profesionalmente en los campos de la robótica, la automatización, los circuitos eléctricos, y las comunicaciones. Ha prestado servicio como profesor huésped en la Universidad de Edinburgo, Escocia; el Instituto Massachusetts de Tecnología (MIT), la Universidad Stanford y la Universidad de California en Berkeley.

Miembro del Institute of Electrical and Electronic Engineers y de la American Society for Engineering Education, el Doctor Dorf es ampliamente conocido en el medio por sus obras *Sistemas de control modernos*, duodécima edición (Pearson, 2011) y *The International Encyclopedia of Robotics* (Wiley, 1988). El Doctor Dorf es coautor de *Circuits, Devices and Systems* (con Ralph Smit), quinta edición (Wiley, 1992). También editó el ampliamente usado *Electrical Engineering Handbook*, tercera edición (CRC Press e IEEE Press) publicado en 2011. Su más reciente obra es *Technology Ventures*, tercera edición (McGraw-Hill, 2013).

Prefacio

El tema central de *Circuitos Eléctricos* es el concepto de que los circuitos eléctricos forman parte de la estructura básica de la tecnología moderna. Ante tal tema, nos esforzaremos por demostrar cómo tanto el análisis y el diseño de circuitos eléctricos están estrechamente enlazados con la habilidad del ingeniero para diseñar sistemas complejos de electrónica, comunicaciones, cómputo y de control, así como productos para el consumidor.

Enfoque y organización

Este libro está diseñado para un curso de uno a tres periodos en circuitos eléctricos o análisis de circuitos lineales, además de que su estructura permite una *flexibilidad* máxima en su manejo. El diagrama de flujo de la figura 1 muestra organizaciones de capítulo alternativas que pueden ajustarse a diferentes perfiles, sin interrumpir la continuidad.

La presentación se acopla a los lectores que van a descubrir los conceptos básicos de los circuitos eléctricos por vez primera y el alcance de este libro es amplio. Los estudiantes deben llegar a este curso con un conocimiento elemental de cálculo diferencial e integral.

Este libro se esfuerza en preparar al lector para que resuelva problemas reales que involucran circuitos eléctricos. Por consiguiente, los circuitos se muestran como resultado de invenciones reales y las respuestas a necesidades reales en la industria, la oficina y el hogar. Aun cuando las herramientas del análisis de circuitos eléctricos pudieran ser parcialmente abstractas, los circuitos eléctricos son los bloques de la construcción de la sociedad moderna, actual. El análisis y diseño de los circuitos eléctricos son habilidades imprescindibles para todos los ingenieros.

Novedades en la novena edición

Revisiones para mejorar la claridad

El capítulo 10, que cubre los circuitos de CA se ha reescrito para mejorar la claridad de la exposición. Además se han hecho revisiones a lo largo del texto con el mismo propósito, las cuales son breves, refiriéndose a oraciones o párrafos. Otras revisiones mayores implicaron páginas o incluso secciones enteras. Con frecuencia estas revisiones contemplan ejemplos. En consecuencia, la novena edición contiene 36 nuevos ejemplos.

Más problemas

La novena edición contiene 180 nuevos problemas, lo que da un total de 1,400 problemas. Esta edición emplea varios tipos de problemas y van desde los sencillos hasta los que significan un reto como:

- Problemas de análisis directos.
- Análisis de circuitos complejos.
- Problemas sencillos de diseño. (Por ejemplo, dados un circuito y la respuesta especificada, determinar los valores *RLC* requeridos.)
- Comparar y contrastar, problemas de multipartes que llaman la atención a las semejanzas o diferencias entre dos situaciones.
- Problemas de MATLAB y PSpice.
- Problemas de diseño. (Dadas ciertas especificaciones, invente un circuito que las satisfaga.)
- ¿Cómo lo podemos comprobar...? (Verifique si una solución es en verdad la correcta.).

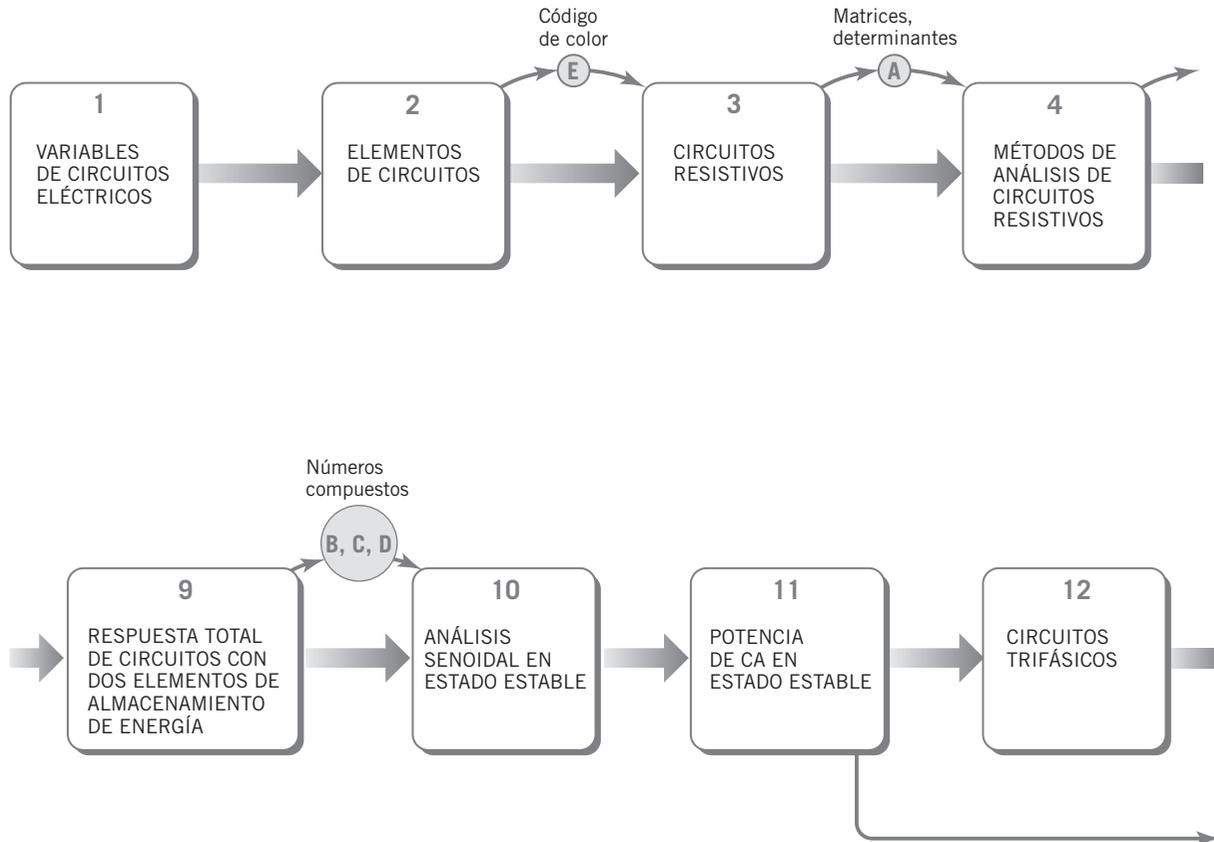


FIGURA 1 Diagrama de flujo que muestra rutas alternativas a través de los temas de este libro.

Características de ediciones anteriores que se conservan

Introducción

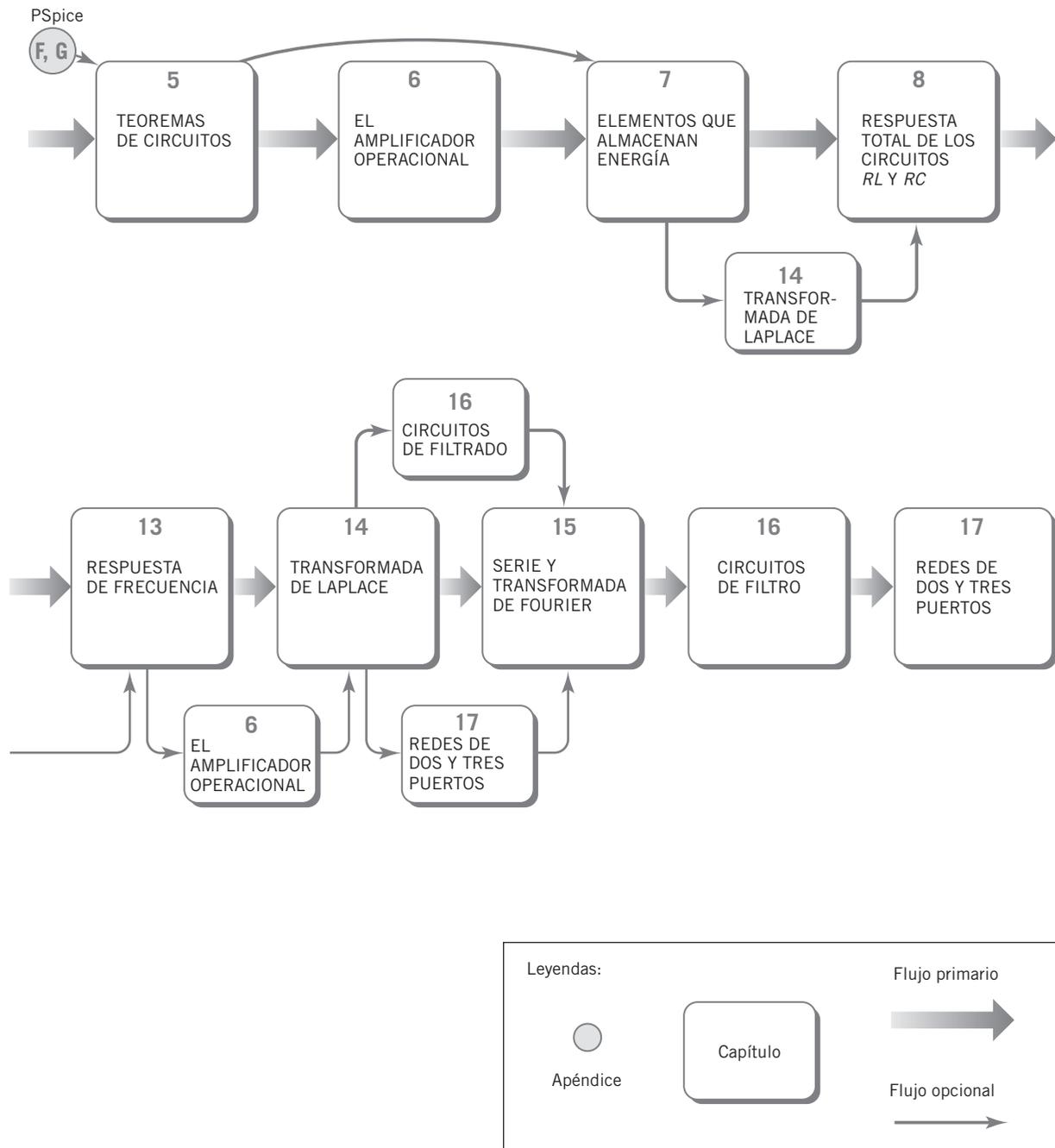
Cada capítulo inicia con una introducción que invita a estudiar el material de ese capítulo.

Ejemplos

Considerando que este libro está orientado a formar expertos en la solución de problemas, hemos incluido más de 260 ejemplos ilustrativos. Incluso, cada ejemplo tiene un título que indica al estudiante qué es exactamente lo que se ilustra en ese ejemplo en particular.

En algunos ejemplos seleccionados se han incorporado varios métodos de solución de problemas. Estos casos indican a los estudiantes que se pueden emplear múltiples métodos para obtener soluciones similares o, en algunos casos, que múltiples soluciones pueden ser correctas. Esto ayuda a los estudiantes a formarse las habilidades de pensar de manera crítica para discernir la mejor opción entre diversos resultados.

De manera importante, se ha dado una mayor atención al uso de PSpice y MATLAB para la resolución de problemas de circuitos. Empieza con dos nuevos apéndices, uno para presentar PSpice y otro para MATLAB. Estos apéndices describen brevemente las capacidades de los programas e ilustran los pasos necesarios para empezar a utilizarlos. A continuación se utilizan PSpice y MATLAB a lo largo del texto para resolver varios problemas de análisis y diseño de circuitos. Por ejemplo, PSpice



se utiliza en el capítulo 5 para encontrar un circuito equivalente de Thévenin, y en el capítulo 15 para representar entradas y salidas de circuitos como series de Fourier. MATLAB se usa frecuentemente para obtener diagramas de entradas y salidas de circuitos que nos ayudan a ver qué nos dicen nuestras ecuaciones. MATLAB también nos ayuda algo con la larga y tediosa aritmética. Por ejemplo, en el capítulo 10, MATLAB nos ayuda a hacer la compleja aritmética para analizar circuitos de corriente alterna (ca), y en el capítulo 14 nos ayuda con la fracción parcial requerida para encontrar las transformaciones inversas de Laplace.

Desde luego, PSpice y MATLAB hacen más que el solo ejecutar los programas. Ponemos especial atención a la interpretación del resultado de estos programas de cómputo y su verificación para estar seguros de que están correctos. Por lo común, esto se hace en la sección “¿Cómo lo podemos comprobar...?” que se incluye en cada capítulo. Por ejemplo, la sección 8.9 muestra cómo interpretar y comprobar una respuesta transitoria de PSpice, y la sección 13.7 muestra cómo interpretar y verificar una respuesta de frecuencia utilizando MATLAB o PSpice.

Las secciones Diseño de ejemplos, Método para resolver un problema, y ¿Cómo lo podemos comprobar...?”

Cada capítulo concluye con un ejemplo de diseño que utiliza los métodos de ese capítulo para resolver un problema de diseño. En el capítulo 1 se presenta un método formal para la solución de problemas en cinco etapas, y que luego se utiliza en cada uno de los ejemplos de diseño. Un paso importante en el método de resolución de problemas requiere que usted mismo compruebe sus resultados para verificar que son correctos. En cada capítulo se incluye una sección “¿Cómo lo podemos comprobar...?” que ilustra cómo se puede comprobar el tipo de resultados obtenidos en ese capítulo para asegurarse de su exactitud.

Ecuaciones clave y fórmulas

Encontrará que las ecuaciones clave, fórmulas y notas importantes se han destacado en un recuadro sombreado para ayudarle a identificar con precisión la información de importancia.

Resumen de tablas y figuras

Los procedimientos y métodos desarrollados en este texto se han resumido en determinadas tablas y figuras clave. Los estudiantes encontrarán que conforman un excelente recurso para la resolución de problemas.

- Tabla 1.5.1. La convención pasiva.
- Figura 2.7.1 y Tabla 2.7-1. Fuentes dependientes.
- Tabla 3.10-1. Fuentes en serie y en paralelo.
- Tabla 3.10-1. Elementos en serie y en paralelo. Voltaje y división de corriente.
- Figura 4.2-3. Nodos de voltajes comparados con corrientes y voltajes de elementos.
- Figura 4.5-4. Enlaces de corrientes comparados con corrientes y voltajes de elementos.
- Figuras 5.4-3 y 5.4-4. Circuitos equivalentes de Thévenin.
- Figura 6.3-1. El amplificador operacional ideal.
- Figura 6.5-1. Catálogo de circuitos de amplificadores operacionales de amplio uso.
- Tabla 7.8-1. Condensadores e inductores.
- Tabla 7.13-2. Condensadores e inductores en serie y en paralelo.
- Tabla 8.11-1. Circuitos de primer orden.
- Tablas 9.13-1, 2 y 3. Circuitos de segundo orden.
- Tabla 10.5-1 Voltaje y división de corriente para circuitos de CA.
- Tabla 10.16-1. Circuitos de CA en el dominio de frecuencia (fasores e impedancias).
- Tabla 11.5-1. Fórmulas de potencia para circuitos de CA.
- Tablas 11.13-1 y 11.13-2. Inductores acoplados y transformadores ideales.
- Tabla 13.4-1. Circuitos resonantes.
- Tablas 14.2-1 y 14.2-2. Tablas de Transformada de Laplace.

- Tabla 14.7-1. Modelos de dominios de elementos de circuitos.
- Tabla 15.4-1. Series de Fourier de formas de onda periódicas seleccionadas.

Introducción al procesamiento de señal

El procesamiento de señal es una aplicación importante de los circuitos eléctricos. Este libro lo presenta de dos maneras. La primera, dos secciones (6.6 y 7.9) describen métodos para diseñar circuitos eléctricos que implementen ecuaciones algebraicas y diferenciales. La segunda, numerosos ejemplos y problemas a lo largo del libro ilustran el procesamiento de señal. Las señales de entrada y salida de un circuito eléctrico están identificadas de manera explícita en cada uno de estos ejemplos y problemas, los cuales investigan la relación entre las señales de entrada y de salida impuesta por el circuito.

Sitio asociado del libro

Se pueden encontrar recursos adicionales para el maestro en el sitio web de la Editorial ubicado en <http://libroweb.alfaomega.com.mx>.

Maestro

- Manual de soluciones
- Diapositivas de PowerPoint

Agradecimientos

Estamos muy agradecidos con las muchas personas cuyos esfuerzos han hecho posible la edición de este libro de texto. En especial agradecemos de manera especial a nuestro Editor Ejecutivo Daniel Sayre, y a Chris Ruel, Gerente Ejecutivo de Marketing, así como a Marisa Carrol, Asistente de Marketing, por su apoyo y entusiasmo. Le estamos muy agradecidos igualmente a Tim Lindner y Kevin Holm de Wiley, y a Bruce Hobbart de Laserwords Maine por sus esfuerzos en la producción de este libro. Deseamos también agradecer a Jenny Welter, Diseñadora Senior de Producto, a Wendy Ashenberg, Editora de Contenido, y a Jess Knecht, Asistente Editorial por sus importantes contribuciones a este proyecto.

Y en particular nuestro agradecimiento al equipo de revisores que verificaron los problemas y soluciones para garantizar su certeza:

Revisores de datos

Khalid Al-Olimat, Ohio Northern
University

Lisa Anneberg, Lawrence
Technological University

Horace Gordon, University of South Florida

Limachos Kondi, SUNY, Buffalo

Michael Polis, Oakland University

Sannasi Ramanan, Rochester Institute
of Technology

William Robins, University of Minnesota

James Rowland, University of Kansas

Mike Shen, Duke University

Thyagarajan Srinivasan, Wilkes
University

Aaron Still, U.S. Naval Academy

Howard Winert, Johns Hopkins

University

Xiao-Bang Xu, Clemson University

Giann Shiun Yuan, University of

Central Florida

Revisores

Rehab Abdel-Kader, Georgia Southern University
 Said Ahmed-Zaid, Boise State University
 Farzan Aminian, Trinity University
 Constantin Apostoiaia, Purdue University Calumet
 Jonathan Bagby, Florida Atlantic University
 Carlotta Berry, Tennessee State University
 Kiron Bordoloi, University of Louisville
 Mauro Caputi, Hofstra University
 Edward Collins, Clemson University
 Glen Dudevoir, U.S. Militar Academy
 Malik Elbuluk, University of Akron
 Prasad Enjeti, Texas A&M University
 Alieydaghi, University of Maryland Eastern Shore
 Carlos Figueroa, Cabrillo College
 Walid Hubbi, New Jersey Institute of Technology
 Brian Huggins, Bradley University
 Chris Ianello, University of Central Florida
 Simone Jarzabek, ITT Technical Institute
 James Kawamoto, Mission College
 Rasool Kenarangui, University of Texas Arlington
 Jumoke Ladeji-Osias, Morgan State University

Mark Lau, Universidad del Turabo
 Seyed Mousavinezhad, Western Michigan University
 Philip Munro, Youngstone State University
 Ahmad Nafisi, California Polytechnic State University
 Arnost Neugroschel, University of Florida
 Tokunbo Ogunfunmi, Santa Clara University
 Gary Perks, California Polytechnic State University, San Luis Obispo
 Owe Petersen, Milwaukee School of Engineering
 Ron Pieper, University of Texas
 Teodoro Robles, Milwaukee School of Engineering
 Pedda Sannuti, Rutgers University
 Marcelo Simoes, Colorado School of Mines
 Ralph Tanner, Western Michigan University
 Tristan Tayag, Texas Christian University
 Jean-Claude Thomassian, Central Michigan University
 John Ventura, Christian Brothers University
 Annette von Jouanne, Oregon State University
 Ravi Warriar, Kettering University
 Gerald Woelfi, Milwaukee School of Engineering
 Hewlon Zimmer, U.S. Merchant Marine Academy

Créditos

Diseño de la cubierta: Madelyn Lesure
 Imágenes de la cubierta:
 © Jivko Kazakov / iStockphoto.com
 Alberto Pomares / Getty Images
 © choicegraphx / iStockphoto.com
 © mattjeacock / iStockphoto.com

Contenido

CAPÍTULO 1

Variables de circuitos eléctricos	1
1.1 Introducción	1
1.2 Circuitos eléctricos y corriente	1
1.3 Sistemas de unidades	5
1.4 Voltaje	7
1.5 Potencia y energía	7
1.6 Análisis y diseño de circuitos	11
1.7 ¿Cómo lo podemos comprobar...?	13
1.8 Ejemplo de diseño — Controlador de válvulas de un motor de propulsión a chorro	14
1.9 Resumen	15
Problemas	15
Problemas de diseño	19

CAPÍTULO 2

Elementos de circuitos	20
2.1 Introducción	20
2.2 Ingeniería y modelos lineales	20
2.3 Elementos de circuito activos y pasivos	23
2.4 Resistencias	25
2.5 Fuentes independientes	28
2.6 Voltímetros y amperímetros	30
2.7 Fuentes dependientes	33
2.8 Transductores	37
2.9 Interruptores	39
2.10 ¿Cómo lo podemos comprobar...?	40
2.11 Ejemplo de diseño — Sensor de temperatura	42
2.12 Resumen	44
Problemas	44
Problemas de diseño	52

CAPÍTULO 3

Circuitos resistivos	53
3.1 Introducción	53
3.2 Leyes de Kirchoff	54
3.3 Resistores en serie y división de voltaje	63
3.4 Resistores en paralelo y división de la corriente	68
3.5 Fuentes de voltaje en serie y fuentes de corriente en paralelo	74
3.6 Análisis de circuitos	77
3.7 Análisis de circuitos resistivos utilizando MATLAB	82
3.8 ¿Cómo lo podemos comprobar...?	86
3.9 Ejemplo de diseño — Fuente de voltaje ajustable	88
3.10 Resumen	91
Problemas	92
Problemas de diseño	112

CAPÍTULO 4

Métodos de análisis de circuitos resistivos.....	114
4.1 Introducción.....	114
4.2 Análisis de voltajes de nodos de circuitos con fuentes de corriente.....	115
4.3 Análisis de voltajes de nodos de circuitos con fuentes de corriente y de voltaje.....	121
4.4 Análisis de voltajes de nodos con fuentes dependientes.....	126
4.5 Análisis de corrientes de enlaces con fuentes de voltaje independientes.....	128
4.6 Análisis de corrientes de enlaces con fuentes de corriente y de voltaje.....	133
4.7 Análisis de corrientes de enlaces con fuentes dependientes.....	137
4.8 Comparación entre el método de voltajes de nodos y el método de corrientes de enlaces.....	139
4.9 Análisis de corrientes de enlaces utilizando MATLAB.....	142
4.10 Uso de PSpice para determinar los voltajes de nodos y las corrientes de enlaces.....	144
4.11 ¿Cómo lo podemos comprobar...?.....	146
4.12 Ejemplo de diseño — Despliegue angular del potenciómetro.....	149
4.13 Resumen.....	152
Problemas.....	153
Problemas de PSpice.....	167
Problemas de diseño.....	167

CAPÍTULO 5

Teoremas de circuitos.....	169
5.1 Introducción.....	169
5.2 Transformaciones de fuentes.....	169
5.3 Superposición.....	176
5.4 Teorema de Thévenin.....	180
5.5 Circuito equivalente de Norton.....	187
5.6 Transferencia de potencia máxima.....	191
5.7 Uso de MATLAB para determinar el circuito equivalente de Thévenin.....	194
5.8 Uso de PSpice para determinar el circuito equivalente de Thévenin.....	197
5.9 ¿Cómo lo podemos comprobar...?.....	200
5.10 Ejemplo de diseño — Puente de indicador de tensión.....	201
5.11 Resumen.....	203
Problemas.....	204
Problemas de PSpice.....	216
Problemas de diseño.....	217

CAPÍTULO 6

El amplificador operacional.....	219
6.1 Introducción.....	219
6.2 El amplificador operacional.....	219
6.3 El amplificador operacional ideal.....	221
6.4 Análisis nodal de circuitos que contienen amplificadores operacionales ideales.....	223
6.5 Diseño mediante el uso de amplificadores operacionales.....	228
6.6 Circuitos de amplificadores operacionales y ecuaciones algebraicas lineales.....	233
6.7 Características de los amplificadores operacionales prácticos.....	238
6.8 Análisis de circuitos de amplificadores operacionales mediante el uso de MATLAB.....	245
6.9 Análisis de circuitos de amplificadores operacionales mediante el uso de PSpice.....	247
6.10 ¿Cómo lo podemos comprobar...?.....	248
6.11 Ejemplo de diseño — Circuito de interfase de transductor.....	250

6.12	Resumen	252
	Problemas	253
	Problemas de PSpice.....	265
	Problemas de diseño	267

CAPÍTULO 7

Elementos que almacenan energía.....		268
7.1	Introducción.....	268
7.2	Condensadores.....	269
7.3	Almacenamiento de energía en un condensador.....	275
7.4	Condensadores en serie y en paralelo	278
7.5	Inductores	280
7.6	Almacenamiento de energía en un inductor	285
7.7	Inductores en serie y en paralelo	287
7.8	Condiciones iniciales de los circuitos permanentes.....	288
7.9	Circuitos de amplificadores operacionales y ecuaciones diferenciales lineales.....	292
7.10	Uso de MATLAB para trazar el voltaje y la corriente de un condensador o un inductor.....	298
7.11	¿Cómo lo podemos comprobar...?.....	300
7.12	Ejemplo de diseño — Integrador e interruptor	301
7.13	Resumen	304
	Problemas	305
	Problemas de diseño	321

CAPÍTULO 8

Respuesta total de los circuitos <i>RL</i> y <i>RC</i>.....		322
8.1	Introducción.....	322
8.2	Circuitos de primer orden	322
8.3	Respuesta de un circuito de primer orden a una entrada constante	325
8.4	Conmutación secuencial	338
8.5	Estabilidad de circuitos de primer orden	340
8.6	Fuente de paso unitario	342
8.7	Respuesta de un circuito de primer orden a una fuente no constante.....	346
8.8	Operadores diferenciales	351
8.9	Uso de PSpice para analizar circuitos de primer orden	352
8.10	¿Cómo lo podemos comprobar...?.....	355
8.11	Ejemplo de diseño — Una computadora y su impresora	359
8.12	Resumen	362
	Problemas	363
	Problemas de PSpice.....	374
	Problemas de diseño	375

CAPÍTULO 9

Respuesta total de circuitos con dos elementos de almacenamiento de energía		378
9.1	Introducción.....	378
9.2	Ecuación diferencial para circuitos con dos elementos de almacenamiento de energía	379
9.3	Solución de la ecuación diferencial de segundo orden: la respuesta natural.....	383

9.4	Respuesta natural del circuito <i>RLC</i> en paralelo no forzado.....	386
9.5	Respuesta natural del circuito <i>RLC</i> en paralelo no forzado críticamente amortiguado.....	389
9.6	Respuesta natural de un circuito <i>RLC</i> en paralelo no forzado subamortiguado.....	390
9.7	Respuesta forzada de un circuito <i>RLC</i>	392
9.8	Respuesta total de un circuito <i>RLC</i>	396
9.9	Método de las variables de estado para el análisis de circuitos.....	399
9.10	Raíces en el plano complejo.....	403
9.11	¿Cómo lo podemos comprobar...?.....	404
9.12	Ejemplo de diseño — Dispositivo de encendido de la bolsa de aire de un automóvil.....	407
9.13	Resumen.....	409
	Problemas.....	411
	Problemas de PSpice.....	422
	Problemas de diseño.....	423

CAPÍTULO 10

Análisis senoidal en estado estable.....425

10.1	Introducción.....	425
10.2	Fuentes senoidales.....	425
10.3	Fasores y senoidales.....	430
10.4	Impedancias.....	435
10.5	Impedancias en serie y en paralelo.....	440
10.6	Enlaces y ecuaciones de nodos.....	447
10.7	Circuitos equivalentes de Thévenin y Norton.....	454
10.8	Superposición.....	459
10.9	Diagramas de fasores.....	461
10.10	Operadores amplificadores en circuitos de CA.....	463
10.11	La respuesta total.....	465
10.12	Uso de MATLAB para el análisis de circuitos CA.....	472
10.13	Uso de PSpice para analizar circuitos de CA.....	474
10.14	¿Cómo lo podemos comprobar...?.....	476
10.15	Ejemplo de diseño — Circuito del amplificador operacional.....	479
10.16	Resumen.....	481
	Problemas.....	482
	Problemas de PSpice.....	502
	Problemas de diseño.....	503

CAPÍTULO 11

Potencia de CA de estado estable.....504

11.1	Introducción.....	504
11.2	Potencia eléctrica.....	504
11.3	Potencia instantánea y potencia promedio.....	505
11.4	Valor efectivo de una forma de onda periódica.....	509
11.5	Potencia compleja.....	512
11.6	Factor de potencia.....	519
11.7	Principio de superposición de potencia.....	527
11.8	Teorema de la transferencia de potencia máxima.....	530
11.9	Inductores acoplados.....	531
11.10	El transformador ideal.....	539

11.11	¿Cómo lo podemos comprobar...?	546
11.12	Ejemplo de diseño — Transferencia de potencia máxima	547
11.13	Resumen	549
	Problemas	551
	Problemas de PSpice	566
	Problemas de diseño	567

CAPÍTULO 12

Circuitos trifásicos	568	
12.1	Introducción	568
12.2	Voltajes trifásicos	569
12.3	Circuito Y a Y	572
12.4	Fuente y carga conectadas a Δ	581
12.5	Circuito Y a Δ	583
12.6	Circuitos trifásicos balanceados	586
12.7	Potencias promedio e instantánea en una carga trifásica balanceada	588
12.8	Medición de potencia con dos vatímetros	591
12.9	¿Cómo lo podemos comprobar...?	594
12.10	Ejemplo de diseño — Corrección del factor de potencia	597
12.11	Resumen	598
	Problemas	599
	Problemas PSpice	602
	Problemas de diseño	603

CAPÍTULO 13

Respuesta de frecuencia	604	
13.1	Introducción	604
13.2	Ganancia, cambio de fase y la función de red	604
13.3	Diagramas de Bode	616
13.4	Circuitos resonantes	633
13.5	Respuesta de frecuencia de circuitos de amplificadores operacionales	640
13.6	Trazo de diagramas de Bode utilizando MATLAB	642
13.7	Uso de PSpice para trazar un diagrama de respuesta de frecuencia	644
13.8	¿Cómo lo podemos comprobar...?	646
13.9	Ejemplo de diseño — Sintonizador de radio	650
13.10	Resumen	652
	Problemas	653
	Problemas de PSpice	666
	Problemas de diseño	668

CAPÍTULO 14

Transformada de Laplace	670	
14.1	Introducción	670
14.2	Transformada de Laplace	671
14.3	Entradas de pulso	677
14.4	Transformada inversa de Laplace	680
14.5	Teoremas del valor inicial y final	687
14.6	Solución de ecuaciones diferenciales que describen un circuito	689

14.7	Análisis de circuitos utilizando impedancia y condiciones iniciales.....	690
14.8	Función de transferencia e impedancia.....	700
14.9	Convolución.....	706
14.10	Estabilidad.....	710
14.11	Expansión de fracción parcial utilizando MATLAB.....	713
14.12	¿Cómo lo podemos comprobar...?.....	718
14.13	Ejemplo de diseño — Compuerta de carga del transbordador espacial.....	720
14.14	Resumen.....	723
	Problemas.....	724
	Problemas de PSpice.....	738
	Problemas de diseño.....	739

CAPÍTULO 15

Serie y transformada de Fourier.....	741	
15.1	Introducción.....	741
15.2	Serie de Fourier.....	741
15.3	Simetría de la función $f(t)$	750
15.4	Serie de Fourier de formas de onda seleccionadas.....	755
15.5	Forma exponencial de la serie de Fourier.....	757
15.6	Espectro de Fourier.....	765
15.7	Circuitos y serie de Fourier.....	769
15.8	Uso de PSpice para determinar la serie de Fourier.....	772
15.9	Transformada de Fourier.....	777
15.10	Propiedades de la transformada de Fourier.....	780
15.11	Espectro de señales.....	784
15.12	Convolución y respuesta del circuito.....	785
15.13	Transformada de Fourier y la transformada de Laplace.....	788
15.14	¿Cómo lo podemos comprobar...?.....	790
15.15	Ejemplo de diseño — Alimentación de potencia de CD.....	792
15.16	Resumen.....	795
	Problemas.....	796
	Problemas de PSpice.....	802
	Problemas de diseño.....	802

CAPÍTULO 16

Circuitos de filtro.....	804	
16.1	Introducción.....	804
16.2	Filtro eléctrico.....	804
16.3	Filtros.....	805
16.4	Filtros de segundo orden.....	808
16.5	Filtros de alto orden.....	816
16.6	Simulación de circuitos de filtro utilizando PSpice.....	822
16.7	¿Cómo lo podemos comprobar...?.....	826
16.8	Ejemplo de diseño — Filtro antialiasing.....	828
16.9	Resumen.....	831
	Problemas.....	831
	Problemas de PSpice.....	836
	Problemas de diseño.....	839

CAPÍTULO 17	
Redes de dos y tres puertos	840
17.1 Introducción	840
17.2 Transformación de T a Π y redes de dos puertos y tres terminales	841
17.3 Ecuaciones de redes de dos puertos	843
17.4 Parámetros Z y Y para un circuito con fuentes dependientes	846
17.5 Parámetros híbridos y de transmisión	848
17.6 Relaciones entre parámetros de dos puertos	850
17.7 Interconexión de redes de dos puertos	852
17.8 ¿Cómo lo podemos comprobar...?	855
17.9 Ejemplo de diseño — Amplificador de transistores	857
17.10 Resumen	859
Problemas	859
Problemas de diseño	863
APÉNDICE A	
Inicios con PSpice	865
APÉNDICE B	
MATLAB, matrices y aritmética compuesta	873
APÉNDICE C	
Fórmulas matemáticas	885
APÉNDICE D	
Código de colores del resistor estándar	889
Referencias	891
Índice	893

CAPÍTULO 1 Variables de circuitos eléctricos

EN ESTE CAPÍTULO

1.1	Introducción	1.5	Potencia y energía	1.8	EJEMPLO DE DISEÑO — Controlador de válvulas de un motor de propulsión a chorro
1.2	Circuitos eléctricos y corriente	1.6	Análisis y diseño de circuitos	1.9	Resumen
1.3	Sistemas de unidades	1.7	¿Cómo lo podemos comprobar...?		Problemas
1.4	Voltaje				Problemas de diseño

1.1 *Introducción*

Un circuito consta de elementos eléctricos conectados entre sí. Los ingenieros utilizan los circuitos eléctricos para resolver problemas de importancia para la sociedad actual. En particular:

1. Los circuitos eléctricos se usan en la generación, transmisión y consumo de la potencia eléctrica y la energía.
2. Los circuitos eléctricos se emplean en la codificación, decodificación, almacenamiento, transmisión y procesamiento de la información.

En este capítulo haremos lo siguiente:

- Representar la corriente y el voltaje de un elemento del circuito eléctrico, prestando particular atención a la dirección de referencia de la corriente y a la dirección de referencia o polaridad del voltaje.
- Calcular la potencia y la energía proporcionadas o recibidas por un circuito.
- Utilizar la convención pasiva para determinar si el producto de la corriente y el voltaje de un elemento de circuito es la potencia proporcionada por ese elemento o la potencia recibida por el elemento.
- Aplicar notación científica para representar cantidades eléctricas con un amplio margen de magnitudes.

1.2 *Circuitos eléctricos y corriente*

Al comparar con otras fuentes de potencia, las principales características de la electricidad son su movilidad y su flexibilidad. La energía eléctrica puede ser trasladada a cualquier punto a lo largo de un conjunto de cables y, dependiendo de las necesidades del usuario, convertida en luz, calor o movimiento.

Un **circuito eléctrico** o red eléctrica es una interconexión de elementos eléctricos unidos entre sí en una vía cerrada, de modo que una corriente eléctrica pueda fluir constantemente.

Considere un circuito sencillo que conste de dos elementos eléctricos bien conocidos, una batería y una resistencia, como se muestra en la figura 1.2-1. Cada elemento está representado por un elemento de dos terminales que se muestran en la figura 1.2-2. A estos elementos a veces se les llama dispositivos, y nodos a las terminales.

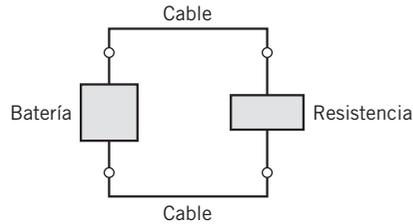


FIGURA 1.2-1 Circuito sencillo.



FIGURA 1.2-2 Elemento eléctrico de dos terminales a y b generales.

La carga puede fluir en un circuito eléctrico. *Corriente es la velocidad de cambio de carga que pasa en un punto dado.* Carga es la propiedad intrínseca de materia que causa los fenómenos eléctricos. La cantidad de carga q se puede expresar en términos de carga en un electrón, es decir, -1.602×10^{-19} culombios. Por tanto, -1 culombio es la carga en 6.24×10^{18} electrones. La corriente a través de un área específica es definida por la carga eléctrica que pasa por el área por unidad de tiempo. En consecuencia, q se define como la carga expresada en culombios (C).

Carga es la cantidad de electricidad causante de los fenómenos eléctricos.

Entonces, lo podemos expresar como

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.2-1)$$

La unidad de corriente es el amperio (A); un amperio es 1 culombio por segundo.

Corriente es la velocidad de flujo de la carga eléctrica que pasa por un punto dado.

Observe que a lo largo de este capítulo utilizamos una letra minúscula, como q , para indicar una variable que es una función de tiempo, $q(t)$; y una mayúscula, como Q , para representar una constante.

El flujo de corriente se representa por convención como un flujo de cargas positivas. Esta convención la inició Benjamín Franklin, primer gran científico estadounidense de la electricidad. Desde luego, ahora sabemos que la carga que fluye en conductores de metal es el resultado de electrones con carga negativa. No obstante, consideraremos la corriente como el flujo de una carga positiva, de acuerdo con la convención aceptada.

La figura 1.2-3 muestra la notación para describir una corriente. Hay dos partes para esta notación: un valor (quizá representado por un nombre de variable) y una dirección asignada. A manera de vocabulario, decimos que se da una corriente *en* o *a través de* un elemento. La figura muestra que hay dos maneras de asignar la dirección de la corriente a través del elemento. La corriente i_1 es la proporción del flujo de carga de electricidad de la terminal a a la b. Por otro lado, la corriente i_2 es el flujo de la carga de electricidad de la terminal b a la a.

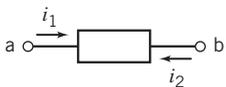
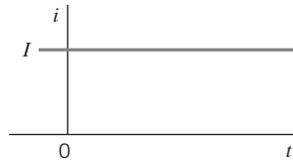


FIGURA 1.2-3 La corriente en un circuito.

FIGURA 1.2-4 Corriente directa de magnitud I .

Las corrientes i_1 e i_2 son semejantes pero diferentes. Tienen el mismo tamaño pero diferentes direcciones. Por lo tanto, i_2 es la negativa de i_1 y entonces

$$i_1 = -i_2$$

Siempre se asocia una flecha con una corriente para indicar su dirección. Una descripción completa de corriente requiere un valor (que puede ser positivo o negativo) y una dirección (indicada por una flecha).

Si la corriente que fluye a través de un elemento es constante, se representa por la constante I , como se muestra en la figura 1.2-4. Una corriente constante se denomina *corriente directa* (CD).

Una **corriente directa** (CD) es una corriente de magnitud constante.

Una corriente que varía con el tiempo $i(t)$ puede tomar varias formas, ya sea de rampa, senoide o exponencial, como se ven en la figura 1.2-5. La corriente sinusoidal se denomina *corriente alterna* (CA).

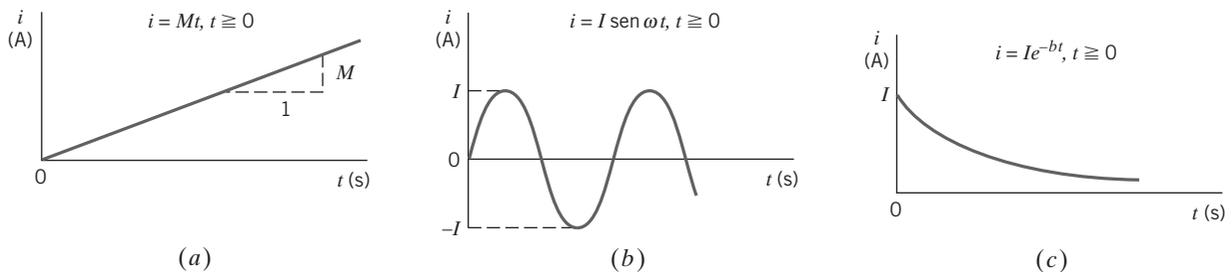


FIGURA 1.2-5 (a) Rampa con una pendiente M . (b) Senoide. (c) Exponencial. I es una constante. La corriente i es cero para $t < 0$.

Si se conoce la carga q , la corriente i se encuentra fácilmente mediante la ecuación 1.2-1. O bien, si se conoce la corriente i , se puede calcular la carga q . Observe que de la ecuación 1.2-1 obtenemos

$$q = \int_{-\infty}^t i \, d\tau = \int_0^t i \, d\tau + q(0) \quad (1.2-2)$$

donde $q(0)$ es la carga en $t = 0$.

EJEMPLO 1.2-1 Corriente a partir de una carga

Obtenga la corriente en un elemento cuando la carga entrante sea

$$q = 12t \text{ C}$$

donde t es el tiempo en segundos.

Solución

Recuerde que la unidad de carga es el culombio, C. Por tanto, la corriente, a partir de la ecuación 1.2-1 es

$$i = \frac{dq}{dt} = 12 \text{ A}$$

donde la unidad de corriente son los amperios, A.

EJEMPLO 1.2-2 Carga a partir de corriente

Obtenga la carga que ha entrado a la terminal de un elemento de $t = 0$ s a $t = 3$ s cuando la corriente entrante al elemento es como se muestra en la figura 1.2-6.

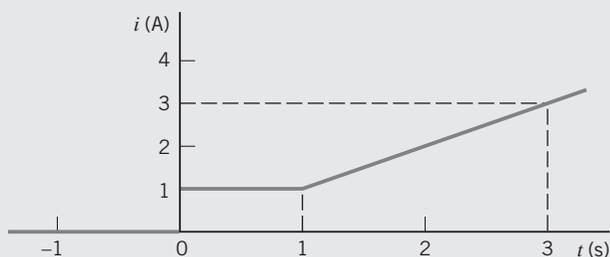


FIGURA 1.2-6 Forma de onda de corriente del ejemplo 1.2-2.

Solución

De la figura 1.2-6 podemos describir $i(t)$ como

$$i(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & 0 < t \leq 1 \\ t & t > 1 \end{cases}$$

Con la ecuación 1.2-2, tenemos

$$\begin{aligned} q(3) - q(0) &= \int_0^3 i(t) dt = \int_0^1 1 dt + \int_1^3 t dt \\ &= t \Big|_0^1 + \frac{t^2}{2} \Big|_1^3 = 1 + \frac{1}{2}(9 - 1) = 5 \text{ C} \end{aligned}$$

De manera alternativa, observamos que esa integración de $i(t)$ de $t = 0$ a $t = 3$ s sólo requiere calcular el área bajo la curva que se muestra en la figura 1.2-6. Entonces tenemos que

$$q = 1 + 2 \times 2 = 5 \text{ C}$$

EJERCICIO 1.2-1 Obtenga la carga que ha entrado en un elemento en tiempo t cuando $i = 8t^2 - 4t$ A, $t \geq 0$. Suponga que $q(t) = 0$ para que $t < 0$.

Respuesta: $q(t) = \frac{8}{3}t^3 - 2t^2$ C

EJERCICIO 1.2-2 La carga total que ha entrado en un circuito es $q(t) = 4 \text{ sen } 3t$ C, cuando $t \geq 0$, y $q(t) = 0$ cuando $t < 0$. Determine la corriente en este circuito para que $t > 0$.

Respuesta: $i(t) = \frac{d}{dt} 4 \text{ sen } 3t = 12 \cos 3t$ A

1.3 *Sistemas de unidades*

Para representar un circuito y sus elementos, debemos definir un sistema que conste de unidades para las cantidades que se presentan en el circuito. En la reunión general de la Conferencia General de Pesos y Medidas de 1960, los representantes modernizaron el sistema métrico y crearon el *Système International d'Unités*, más conocido como Unidades SI.

SI es el *Système International d'Unités*; o International System of Units.

Las unidades fundamentales, o básicas, del SI se muestran en la tabla 1.3-1. Los símbolos de unidades que representan nombres propios (de persona) van con inicial mayúscula, los demás no. No se usan puntos después de los símbolos, y los símbolos no tienen forma plural. Las unidades derivadas de otras cantidades físicas se obtienen de la combinación de unidades fundamentales. La tabla 1.3-2 muestra las unidades derivadas más comunes junto con sus fórmulas en términos de unidades fundamentales o unidades derivadas anteriores. Se muestran los símbolos para las unidades que los tienen.

Tabla 1.3-1 Unidades base del SI

CANTIDAD	UNIDADES SI	
	NOMBRE	SÍMBOLO
Longitud	metro	m
Masa	kilogramo	kg
Tiempo	segundo	s
Corriente eléctrica	amperio	A
Temperatura termodinámica	kelvin	K
Cantidad de sustancia	mol	mol
Intensidad luminosa	candela	cd

Tabla 1.3-2 Unidades derivadas del SI

CANTIDAD	NOMBRE DE UNIDAD	FÓRMULA	SÍMBOLO
Aceleración – lineal	metro por segundo cuadrado	m/s^2	
Velocidad – lineal	metro por segundo	m/s	
Frecuencia	hertz	s^{-1}	Hz
Fuerza	newton	$kg \cdot m/s^2$	N
Presión o tensión	pascal	N/m^2	Pa
Densidad	kilogramo por metro cúbico	kg/m^3	
Energía de trabajo	joule (julio)	$N \cdot m$	J
Potencia	watt (vatio)	J/s	W
Carga eléctrica	culombio	$A \cdot s$	C
Potencial eléctrico	voltio	W/A	V
Resistencia eléctrica	ohmio	V/A	Ω
Conductancia eléctrica	siemens	A/V	S
Capacitancia eléctrica	faradios	C/V	F
Flujo magnético	weber	$V \cdot s$	Wb
Inductancia	henry	Wb/A	H

Tabla 1.3-3 Prefijos SI

MÚLTIPLO	PREFIJO	SÍMBOLO
10^{12}	tera	T
10^9	giga	G
10^6	mega	M
10^3	kilo	k
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	mili	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	femto	f

Las unidades básicas como las de longitud en metros (m), de tiempo en segundos (s), y de corriente en amperios (A), se pueden usar para obtener unidades. Así, por ejemplo, tenemos la unidad de carga (C) resultado del producto de corriente y tiempo ($A \cdot s$). La unidad fundamental para la energía es el joule (J), la cual es fuerza por distancia o $N \cdot m$.

La gran ventaja del sistema SI es que incorpora un sistema decimal para que haya una relación en cantidades mayores o menores con respecto a la unidad básica. Las potencias de 10 se representan por los prefijos estándar que se muestran en la tabla 1.3-3. Un ejemplo del uso común de un prefijo es el centímetro (cm), que es 0.01 metros, o la centésima parte de un metro.

El multiplicador decimal siempre debe acompañar a las unidades apropiadas y nunca se escribe solo. De manera que podemos escribir 2 500 W como 2.5 kW. Del mismo modo, podemos escribir 0.012 A como 12 mA.

EJEMPLO 1.3-1 Unidades del SI

Una masa de 150 gramos experimenta una fuerza de 100 newtons. Obtenga la energía o trabajo que se consumió si la masa se movió 10 centímetros. Además, obtenga la potencia si la masa completa su movimiento en 1 milisegundo.

Solución

La energía se encuentra como

$$\text{energía} = \text{fuerza} \times \text{distancia} = 100 \times 0.1 = 10 \text{ J}$$

Observe que la distancia se utilizó en unidades de metros. La potencia se encuentra a partir de

$$\text{potencia} = \frac{\text{energía}}{\text{periodo de tiempo}}$$

donde el periodo de tiempo es 10^{-3} s. Por consiguiente,

$$\text{potencia} = \frac{10}{10^{-3}} = 10^4 \text{ W} = 10 \text{ kW}$$

EJERCICIO 1.3-1 ¿Cuál de las tres corrientes $i_1 = 45 \mu\text{A}$, $i_2 = 0.03 \text{ mA}$, e $i_3 = 25 \times 10^{-4} \text{ A}$, es la más grande?

Respuesta: i_3 es la más grande.

1.4 Voltaje

Las variables básicas en un circuito eléctrico son la corriente y el voltaje. Estas variables describen el flujo de carga a través de los elementos de un circuito y la energía requerida para que la carga fluya. La figura 1.4-1 muestra la notación para describir un voltaje. Hay dos partes en esta notación: un valor (quizá representado por una variable de nombre) y una dirección asignada. El valor de un voltaje puede ser positivo o negativo. La dirección se la dan sus polaridades (+, -). Como una cuestión de vocabulario, se dice que un voltaje ocurre *a través de* un elemento. La figura 1.4-1 muestra que hay dos formas de marcar el voltaje a través de un elemento. El voltaje v_{ba} es proporcional al trabajo requerido para mover una carga positiva de la terminal a a la b. Por otra parte, el voltaje v_{ab} es proporcional al trabajo requerido para mover una carga positiva de la terminal b a la a. En ocasiones v_{ba} se lee como “el voltaje de la terminal b con respecto a la terminal a”. Del mismo modo, v_{ab} se puede leer como “el voltaje en la terminal a con respecto a la terminal b”. De manera alternativa, a veces se dice que v_{ba} es el voltaje que va de la terminal a a la b. Los voltajes v_{ab} y v_{ba} son semejantes pero diferentes. Tienen la misma magnitud pero diferentes polaridades. Eso significa que

$$v_{ab} = -v_{ba}$$

Si se considera v_{ba} , la terminal b se denomina “terminal +” y la terminal a se denomina “terminal -”. Por otra parte, cuando nos referimos a v_{ab} , la terminal a se denomina la “terminal +” y la terminal b es la “terminal -”.

El **voltaje** que pasa a través de un elemento es el trabajo (energía) que se requiere para mover una unidad de carga positiva de la terminal - a la terminal +. La unidad de voltaje es el voltio, V.

La ecuación para el voltaje que pasa a través del elemento es

$$v = \frac{dw}{dq} \quad (1.4-1)$$

donde v es el voltaje, w es la energía (o trabajo), y q es la carga. Una carga de 1 culombio entrega una energía de 1 joule al moverse a través de un voltaje de 1 voltio.

1.5 Potencia y energía

La potencia y la energía que se entregan a un elemento tienen una gran importancia. Por ejemplo, la salida usual de una lámpara incandescente, o foco, se puede expresar en términos de potencia. Un foco de 300 watts (vatios) proporciona más luz que uno de 100 watts.

Potencia es el periodo de gasto o absorción de energía.

Por lo tanto, tenemos la ecuación

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1.5-1)$$

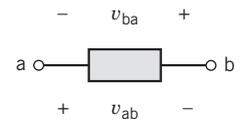
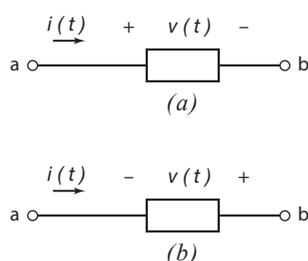
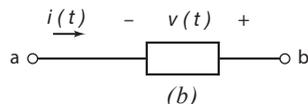


FIGURA 1.4-1
Voltaje a través de un elemento del circuito.



donde p es potencia en watts, w es energía en joules, y t es tiempo en segundos. La potencia asociada con la carga que fluye a través de un elemento es

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = v \cdot i \quad (1.5-2)$$



Apartir de la ecuación 1.5-2 vemos que potencia es simplemente el producto del voltaje a través de un elemento por la corriente mientras la corriente fluye a través del elemento. La potencia tiene unidades de watts.

A cada elemento de un circuito se asignan dos variables de circuito: un voltaje y una corriente. La figura 1.5-1 muestra que hay dos diferentes maneras de arreglar la dirección de la corriente y la polaridad del voltaje. En la figura 1.5-1a, la corriente entra en el circuito en la terminal + del voltaje y sale en la terminal -. Por el contrario, en la figura 1.5-b, la corriente entra en el elemento del circuito en la terminal - del voltaje y sale en la terminal +.

FIGURA 1.5-1 (a) El elemento de tensión y corriente se **adhieren** a la convención pasiva (b) La tensión de elemento y la corriente **no se adhieren** a la convención pasiva

Primero veamos la figura 1.5-1a. Cuando la corriente entra en el elemento de circuito en la terminal + del voltaje y sale en la terminal -, se dice que el voltaje y la corriente se “apegan a la convención pasiva”. En ella, el voltaje impulsa una carga positiva en la dirección indicada por la corriente. Según esto, la potencia calculada al multiplicar el voltaje del elemento por la corriente del elemento

$$p = vi$$

es la potencia **recibida** por el elemento. (Esta potencia también se denomina “potencia absorbida por el elemento”). La potencia absorbida por un elemento puede ser tanto positiva como negativa, lo cual dependerá de los valores del voltaje y la corriente del elemento.

A continuación, veamos la figura 1.5-1b. Aquí no se ha utilizado la convención pasiva. En cambio, la corriente entra al elemento de circuito en la terminal - del voltaje y sale en la terminal +. En este caso, el voltaje impulsa una carga positiva en la dirección opuesta a la indicada por la corriente. Por consiguiente, cuando el voltaje y la corriente del elemento no se apegan a la convención pasiva, la potencia calculada al multiplicar el voltaje de del elemento por la corriente del elemento es la potencia **alimentada** por el elemento. La potencia alimentada por un elemento puede ser positiva o negativa, dependiendo de los valores del voltaje y la corriente del elemento.

La potencia recibida por n elemento en la energía alimentada por ese mismo elemento están relacionadas por

$$\text{potencia recibida} = - \text{potencia alimentada}$$

En la tabla 1.5-1 se resumen las reglas de la convención pasiva. Cuando el voltaje y la corriente del elemento se apegan a la convención pasiva, la energía absorbida por un elemento se puede determinar

Tabla 1.5-1 Potencia recibida o alimentada por un elemento

POTENCIA RECIBIDA POR UN ELEMENTO	POTENCIA ALIMENTADA POR UN ELEMENTO
<p>Dado que las direcciones de referencia de v e i se apegan a la convención pasiva, la potencia</p> $p = vi$ <p>es la potencia recibida por el elemento.</p>	<p>Dado que las direcciones de referencia de v e i no se apegan a la convención pasiva, la potencia</p> $p = vi$ <p>es la potencia alimentada por el elemento.</p>

por la ecuación 1.5-1 al reescribirla como

$$dw = p dt \quad (1.5-3)$$

Al integrarla tenemos

$$w = \int_{-\infty}^t p d\tau \quad (1.5-4)$$

Si el elemento sólo recibe potencia para $t \geq t_0$ y obtenemos $t_0 = 0$, entonces tenemos

$$w = \int_0^t p d\tau \quad (1.5-5)$$

EJEMPLO 1.5-1 Potencia y energía eléctricas

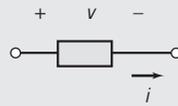


FIGURA 1.5-2 El elemento considerado en el ejemplo 1.5-1.

Consideremos el elemento que se muestra en la figura 1.5-2 cuando $v = 8 \text{ V}$ e $i = 25 \text{ mA}$. Obtenga la potencia absorbida por el elemento y la energía absorbida durante un intervalo de 10-ms.

Solución

En la figura 1.5-2 la corriente i y el voltaje v se apegan a la convención pasiva. En consecuencia la potencia

$$p = vi = 8 (0.025) = 0.2 \text{ W} = 200 \text{ mW}$$

Es la potencia *recibida* por el elemento del circuito. A continuación, la energía absorbida por el elemento es

$$w = \int_0^t p dt = \int_0^{0.010} 0.2 dt = 0.2(0.010) = 0.002\text{J} = 2 \text{ mJ}$$

EJEMPLO 1.5-2 Potencia eléctrica y la convención pasiva

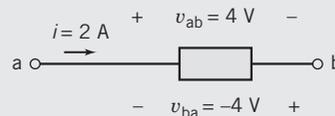


FIGURA 1.5-3 El elemento considerado en el ejemplo 1.5-2.

Considere el elemento que se muestra en la figura 1.5-3. La corriente i y el voltaje v_{ba} se apegan a la convención pasiva, por lo que

$$i \cdot v_{ba} = 2 \cdot (-4) = -8 \text{ W}$$

es la potencia *absorbida* por este elemento. La corriente i y el voltaje v_{ab} no se apegan a la convención pasiva, por lo que

$$i \cdot v_{ab} = 2 \cdot (4) = 8 \text{ W}$$

es la potencia alimentada por este elemento. Como se esperaba

$$\text{potencia absorbida} = -\text{potencia alimentada}$$

EJEMPLO 1.5-3 Potencia, energía y la convención pasiva

Considere el circuito que se muestra en la figura 1.5-4 con $v(t) = 12e^{-8t}$ V e $i(t) = 5e^{-8t}$ A para que $t \geq 0$. Ambos $v(t)$ e $i(t)$ sean cero para $t < 0$. Obtenga la potencia alimentada por el elemento durante los primeros 100 ms de funcionamiento.

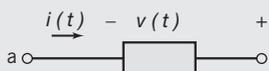


FIGURA 1.5-4 El elemento considerado en el Ejemplo 1.5-3.

Solución

La potencia

$$p(t) = v(t)i(t) = (12e^{-8t})(5e^{-8t}) = 60e^{-16t} \text{ W}$$

es la potencia alimentada por el elemento porque $v(t)$ e $i(t)$ no se apegan a la convención pasiva. Este elemento alimenta la potencia para la carga que fluye a través del elemento.

La energía alimentada durante los primeros 100 ms = 0.1 segundos es

$$\begin{aligned} w(0.1) &= \int_0^{0.1} p dt = \int_0^{0.1} (60e^{-16t}) dt \\ &= 60 \frac{e^{-16t}}{-16} \Big|_0^{0.1} = -\frac{60}{16} (e^{-1.6} - 1) = 3.75 (1 - e^{-1.6}) = 2.99 \text{ J} \end{aligned}$$

EJEMPLO 1.5-4 Energía en un rayo

La corriente promedio en un rayo común es de 2×10^4 A, y su duración suele ser de 0.1 s (Williams, 1988). El voltaje entre las nubes y el suelo es de 5×10^8 V. Determine la carga total transmitida a la tierra y la energía liberada.

Solución

La carga total es

$$Q = \int_0^{0.1} i(t) dt = \int_0^{0.1} 2 \times 10^4 dt = 2 \times 10^3 \text{ C}$$

La energía total liberada es

$$w = \int_0^{0.1} i(t) \times v(t) dt = \int_0^{0.1} (2 \times 10^4)(5 \times 10^8) dt = 10^{12} \text{ J} = 1 \text{ TJ}$$

EJERCICIO 1.5-1 La figura E 1.5-1 muestra cuatro elementos de circuito identificados con las letras A, B, C y D.

- ¿Cuál de los dispositivos alimenta 12 W?
- ¿Cuál de los dispositivos absorbe 12 W?

- (c) ¿Cuál es el valor de la potencia recibida por el dispositivo *B*?
- (d) ¿Cuál es el valor de la potencia entregada por el dispositivo *B*?
- (e) ¿Cuál es el valor de la potencia entregada por el dispositivo *D*?

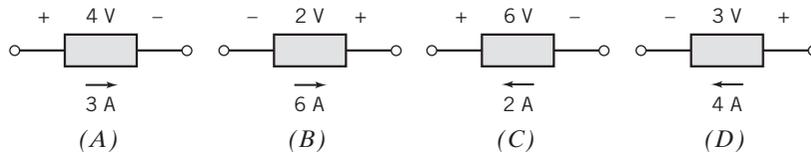


FIGURA E 1.5-1

Respuestas: (a) B y C, (b) A y D, (c) -12 W, (d) 12 W, (e) -12 W

1.6 Análisis y diseño de circuitos

El análisis y diseño de circuitos eléctricos son las actividades primarias que se describen en este libro, a la vez que son las habilidades propias de un ingeniero electricista. El *análisis* de un circuito tiene que ver con el estudio metódico del circuito dado diseñado para obtener la magnitud y dirección de una o más variables de circuitos, como una corriente o el voltaje.

El proceso del análisis empieza con una exposición del problema, y por lo común se incluye un modelo de circuito dado. El objetivo es determinar la magnitud y la dirección de una o más variables de circuito, y la tarea final es verificar que la solución propuesta sea la correcta. Suele suceder que el ingeniero identifique primero lo que se conoce y los principios que utilizará para determinar la variable desconocida.

En la figura 1.6-1 se muestra el método que se seguirá a lo largo de este libro para la solución del problema. Por lo general se da el planteamiento del problema. Entonces el proceso de análisis se mueve de manera secuencial pasando por las cinco etapas que se muestran en la figura 1.6-1. En la primera se describen la situación y los supuestos. En la segunda se establecen los objetivos y

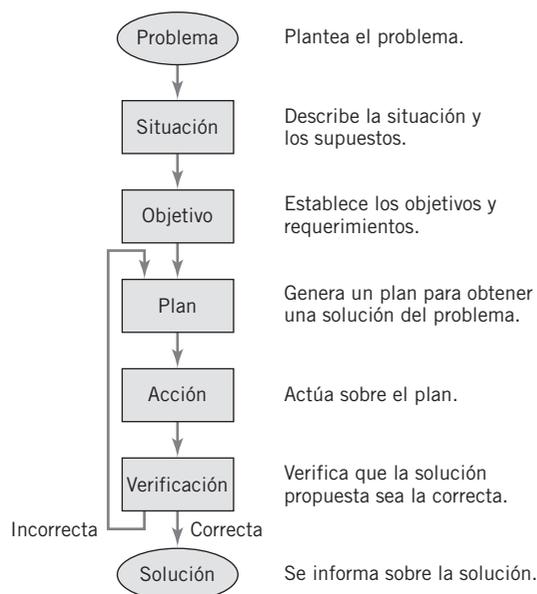


FIGURA 1.6-1 El método para la solución del problema.

requerimientos, y por lo común se registra la variable de circuito requerida que se ha de determinar. La tercera etapa es para generar un plan que ayudará a obtener la solución del problema. La cuarta etapa implica efectuar las actividades que se planearon y hacer un seguimiento a las etapas descritas en el plan. En la etapa final se verifica que la solución propuesta sea la correcta. Si lo es, se informa sobre la solución y se registra por escrito o se presenta de viva voz. Si la etapa de verificación indica que la solución propuesta no es la correcta o es inadecuada, entonces se vuelve a las etapas del plan, para reformular un plan mejorado y se repiten las etapas 4 y 5.

Para ilustrar este método analítico se propone un ejemplo. En el ejemplo 1.6-1 utilizaremos las etapas descritas en el método de solución de problemas de la figura 1.6-1.

EJEMPLO 1.6-1 El método formal para la solución del problema

Un experimentador en un laboratorio supone que un elemento está absorbiendo potencia y utiliza un voltímetro y un amperímetro para medir el voltaje y la corriente como se muestra en la figura 1.6-2. Las mediciones indican que el voltaje es $v = +12 \text{ V}$ y que la corriente es $i = -2 \text{ A}$. Determine si el supuesto del experimentador es correcto.

Describa la situación y los supuestos: estrictamente hablando, el elemento *está* absorbiendo potencia. El valor de la potencia absorbida por el elemento puede ser positiva, nula o negativa. Cuando decimos que alguien “supone que un elemento está absorbiendo potencia” significa que alguien asume que la potencia absorbida por el elemento es positiva.

Los medidores son ideales. Se conectan al elemento de tal manera que midan el voltaje marcado v y la corriente marcada como i . Los valores del voltaje y de la corriente aparecen en las lecturas de los medidores.

Establezca los objetivos: es calcular la potencia absorbida por el elemento para determinar si el valor de la potencia absorbida es positivo.

Genere un plan: es verificar que el voltaje y la corriente del elemento se apegan a la convención pasiva. Si es así, la potencia absorbida por el dispositivo es $p = vi$. Si no lo es, la potencia absorbida por el dispositivo es $p = -vi$.

Actúe sobre el plan: refiriéndose a la tabla 1.5-1, podemos ver que el voltaje y la corriente del elemento se apegan a la convención pasiva. Por lo tanto, la potencia absorbida por el elemento es

$$p = vi = 12 \cdot (-2) = -24 \text{ W}$$

El valor de la potencia absorbida no es positivo.

Verifique la solución propuesta: implica invertir las pruebas, como se muestra en la figura 1.6-3. Ahora el amperímetro mide la corriente i_1 en vez de la corriente i , por lo que $i_1 = 2 \text{ A}$ y $v = 12 \text{ V}$. Puesto que i_1 y v no se apegan a la convención pasiva, $p = i_1 \cdot v = 24 \text{ W}$ es la potencia alimentada por el elemento. Alimentar 24 W es el equivalente a absorber -24 W , por consiguiente, verificar la solución propuesta.

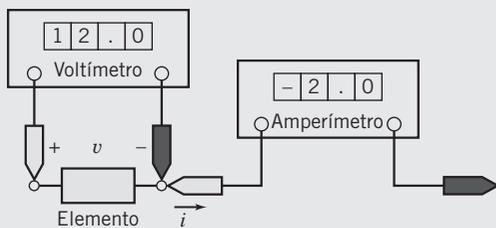


FIGURA 1.6-2 Un elemento con un voltímetro y un amperímetro.

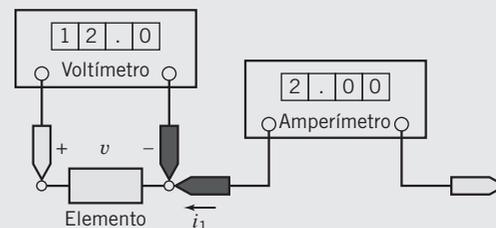


FIGURA 1.6-3 El circuito de la figura 1.6-2 probado al revés con el amperímetro.