

Introducción

OBJETIVOS

Después de estudiar este capítulo, debería ser capaz de:

- Nombrar los tres tipos de fórmulas y explicar por qué cada una es correcta.
- Explicar la causa por la que se usan a menudo aproximaciones en lugar de fórmulas exactas.
- Definir una fuente ideal de tensión y una fuente ideal de corriente.
- Demostrar cómo reconocer una fuente de tensión constante y una fuente de corriente constante.
- Enunciar el teorema de Thevenin y aplicarlo a un circuito.
- Enunciar el teorema de Norton y aplicarlo a un circuito.
- Indicar dos características de los dispositivos en circuito abierto y en cortocircuito.

VOCABULARIO

- | | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| • aproximación ideal | • dispositivo en circuito abierto | • resistencia de Thevenin |
| • corriente de Norton | • fórmula | • segunda aproximación |
| • definición | • ley | • tensión de Thevenin |
| • derivación | • principio de dualidad | • teorema |
| • detección de averías | • puente de soldadura | • tercera aproximación |
| • dispositivo en cortocircuito | • resistencia de Norton | • unión de soldadura fría |

En este capítulo se van a estudiar los distintos tipos de fórmulas, de fuentes de tensión, de fuentes de corriente y dos teoremas para resolver circuitos. Aunque parte de la exposición constituye un repaso, se encontrarán varias ideas nuevas que facilitarán la comprensión de los dispositivos semiconductores.

1-1. LOS TRES TIPOS DE FÓRMULAS

Una fórmula es una regla que relaciona cantidades, ya sea mediante una ecuación, una desigualdad u otra descripción matemática. Se encontrará muchas fórmulas en este texto. A menos que se sepa por qué cada una es correcta, se puede llegar a confundir a medida que se acumulan. Afortunadamente, sólo existen tres formas en las que las fórmulas puedan expresarse; conociéndolas, el estudio de la electrónica se hará mucho más sencillo.

□ La definición

Cuando se estudia electricidad y electrónica se han de memorizar nuevas palabras como, por ejemplo, corriente, tensión y resistencia. Sin embargo,

2 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

una explicación verbal de las mismas no es suficiente, ya que en el caso de la corriente la idea que se tiene debe ser matemáticamente idéntica a la de cualquier otra persona. La única manera de obtener esta identidad es con una definición, una fórmula inventada para un nuevo concepto.

Si se toma como ejemplo la definición de capacidad, se tiene que ésta es igual a la carga de una placa dividida por la tensión entre las placas de un condensador. La fórmula es la siguiente:

$$C = \frac{Q}{V}$$

Esta fórmula es una definición. Dice qué capacidad tiene C y cómo calcularla. En el pasado, algunos investigadores idearon esta definición y llegó a ser ampliamente aceptada.

Aquí hay un ejemplo de cuál es la manera de crear una nueva definición a partir de cero. Se supone que estamos investigando técnicas de lectura y se necesita medir la velocidad de lectura. Para empezar, se podría definir la velocidad de lectura como el número de palabras que se leen en un minuto. Si el número de palabras es W y el número de minutos es M , podemos crear una fórmula como ésta:

$$S = \frac{W}{M}$$

En esta ecuación, S es la medida de velocidad en palabras por minuto.

Para ser creativo podemos utilizar letras griegas: ω para palabras, μ para minutos y σ para velocidad. Nuestra definición entonces quedaría así:

$$\sigma = \frac{\omega}{\mu}$$

Esta ecuación se sigue traduciendo como la velocidad es igual a las palabras divididas por minutos.

En resumen, las definiciones son fórmulas que crean los investigadores, basadas en observaciones científicas y que forman las bases para el estudio de la electrónica. Son aceptadas simplemente como hechos. Siempre se ha hecho en la ciencia: una definición es verdadera en el mismo sentido que una palabra es verdadera; cada una representa algo de lo que queremos hablar. Cuando sabemos qué fórmulas son definiciones, la electrónica es fácil de entender. Como las definiciones son puntos de partida, todo lo que se necesita hacer es entenderlas y memorizarlas.

□ La ley

Una ley es diferente a lo estudiado en el apartado anterior, ya que *sintetiza una relación ya existente en la naturaleza*. Aquí tenemos un ejemplo de una ley:

$$f = K \frac{Q_1 Q_2}{d^2}$$

donde: f = fuerza
 K = constante de proporcionalidad, $9(10^9)$
 Q_1 = primera carga
 Q_2 = segunda carga
 d = distancia entre cargas

Aquí tenemos la **ley de Coulomb**: *la fuerza de atracción o repulsión entre dos cargas es directamente proporcional a la carga e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas.*

Esta es una ecuación importante porque es la base de la electricidad. Pero ¿de dónde procede? Y ¿por qué es cierta? Para empezar, todas las variables en esta ley existían antes de ser descubiertas. Experimentando, Coulomb fue capaz de demostrar que la fuerza era directamente proporcional al valor de cada carga e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. La ley de Coulomb es un ejemplo de una relación que existe en la naturaleza. Aunque investigadores anteriores pudieron medir f , Q_1 , Q_2 y d , Coulomb descubrió la ley relacionando las cantidades y escribió la fórmula para ello.

Antes de descubrir una ley, alguien debe tener el presentimiento de que tal relación existe. Después de unos cuantos experimentos, el investigador escribe la fórmula que resume el descubrimiento. Cuando suficientes personas confirman el descubrimiento a través de experimentos, dicha fórmula se convierte en una ley. *Una ley es verdadera porque se puede verificar con un experimento.*

□ La derivación

Dada una ecuación como la siguiente:

$$y = 3x$$

se puede sumar 5 a ambos miembros para obtener:

$$y + 5 = 3x + 5$$

La nueva ecuación es cierta, ya que ambos lados siguen siendo iguales. Existen otras muchas operaciones matemáticas, como la resta, la multiplicación, la división, la factorización y la sustitución, que preservan la igualdad a ambos lados de la ecuación. Por esta razón, es posible derivar muchas otras fórmulas.

Una **derivación** es una fórmula que se puede obtener a partir de otras, lo que significa que se comienza con una o más fórmulas y, empleando las distintas operaciones matemáticas, se llega a una nueva que no estaba en el conjunto original. Una derivación es verdadera porque matemáticamente preserva la igualdad de ambos lados de cada ecuación entre la fórmula inicial y la derivada.

Por ejemplo, Ohm experimentaba con conductores. Descubrió que la relación entre la tensión y la corriente era constante y nombró a esta constante *resistencia*, y escribió la siguiente ecuación para ella:

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

4 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

Ésta es la forma original de la ley de Ohm. Al reordenarla, obtenemos:

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

que es una derivación. Es la forma original de la ley de Ohm convertida en otra ecuación.

Éste es otro ejemplo. La definición para capacidad viene dada por la expresión:

$$C = \frac{Q}{V}$$

Podemos multiplicar ambos lados por V para llegar a una nueva ecuación:

$$Q = CV$$

Ésta es una nueva derivación; dice que la carga en un condensador es igual a su capacidad multiplicada por la tensión que lo atraviesa.

□ Para recordar

¿Por qué una fórmula es verdadera? Hay tres posibles respuestas. Para asentar bien sus fundamentos electrónicos, clasifique cada nueva fórmula en una de estas tres categorías:

- **Definición:** una fórmula inventada para un nuevo concepto.
- **Ley:** una fórmula para una relación de la naturaleza.
- **Derivación:** una fórmula producida matemáticamente.

1-2. APROXIMACIONES

En la vida cotidiana se usan aproximaciones continuamente. Si alguien te pregunta la edad, puedes contestar 21 (ideal); o podrías decir 21 para 22 (segunda aproximación); o, quizás, 21 años y nueve meses (tercera aproximación); o, si quieres ser más preciso, 21 años, nueve meses, 2 días, 6 horas, 23 minutos y 42 segundos (exacto).

El ejemplo anterior ilustra los diferentes niveles de aproximación: una aproximación ideal, una segunda aproximación, una tercera aproximación y una respuesta exacta. La aproximación que se debe usar depende de cada situación. Lo mismo se aplica en la electrónica. En análisis de circuitos, es necesario elegir una aproximación que se ajuste a la situación.

□ La aproximación ideal

¿Sabías que un cable AWG 22 de unos 33 cm que está a 2,4 cm de un chasis tiene una resistencia de 0,016 Ω , una inductancia de 0,24 μH y una capacidad de 3,3 pF? Si tuviésemos que incluir los efectos de la resistencia, la inductancia y la capacidad en cada cálculo de la corriente, emplearíamos

una cantidad enorme de tiempo en realizarlo. Ésta es la razón por la que todo el mundo ignora las tres variables anteriores de los cables de conexión en la mayoría de las ocasiones.

La aproximación ideal (algunas veces llamada la *primera aproximación*) **de un dispositivo** es el *circuito equivalente más simple de ese dispositivo*. En el caso de un cable de conexión, la aproximación es un conductor de resistencia cero. La aproximación ideal es adecuada para los trabajos cotidianos de electrónica.

La excepción se produce cuando se trabaja en frecuencias altas, donde se tienen que considerar las capacitancias y las inductancias del cable. Supóngase que un cable de 2,4 cm tiene una inductancia de $0,24 \mu\text{H}$ y una capacidad de $3,3 \text{ pF}$. A 10 MHz , la reactancia inductiva es $15,1 \Omega$, y la reactancia capacitiva es $4,82 \text{ k}\Omega$. Como se puede observar, un diseñador de circuitos ya no puede idealizar un segmento de cable, porque dependiendo del resto del circuito, las inductancias y reactancias capacitivas del mismo pueden llegar a ser importantes.

Como norma general, es posible hacer una aproximación ideal en un segmento de cable a frecuencias inferiores a 1 MHz , lo que no significa que se pueda descuidar el cableado. En general, se deben hacer los cables de conexión tan cortos como sea factible, porque en algún punto en la escala de frecuencias, esos cables empezarán a degradar el funcionamiento del circuito.

Cuando se están detectando averías, normalmente es adecuada la aproximación ideal, porque se buscan grandes desviaciones de las tensiones y de las corrientes normales. En este texto se hace una aproximación ideal a los dispositivos semiconductores reduciéndolos a circuitos equivalentes simples, ya que, con dichas aproximaciones, es más sencillo analizar y entender cómo funcionan los circuitos de semiconductores.

□ La segunda aproximación

La aproximación ideal de una pila de linterna es una fuente de tensión de $1,5 \text{ V}$. La **segunda aproximación** *añade uno o más componentes a la aproximación ideal*.

Por ejemplo, la segunda aproximación de una pila de linterna es una fuente de tensión de $1,5 \text{ V}$ en serie con una resistencia de 1Ω . Esta resistencia en serie se denomina *resistencia de fuente* o *interna* de la pila. Si la resistencia de carga es menor que 10Ω , la tensión en la carga será notablemente menor que $1,5 \text{ V}$ a causa de la caída de tensión en la resistencia de fuente. En este caso, un cálculo preciso debe incluir la resistencia de fuente.

□ La tercera aproximación y siguientes

La **tercera aproximación** incluye otro componente en el circuito equivalente del dispositivo. En el Capítulo 3 se ofrece un ejemplo de la misma cuando se presenten los diodos semiconductores.

Es posible realizar aproximaciones incluso superiores con muchos componentes en el circuito equivalente de un dispositivo. Los cálculos a mano se hacen muy complicados si se usan estas aproximaciones, por lo que normal-

6 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

mente se emplean programas de ordenador como, por ejemplo, *Electronics Workbench* (abreviado EWB), que es un programa comercial que usa aproximaciones superiores para analizar circuitos semiconductores. En numerosos ejemplos de este libro nos hemos servido de EWB para obtener respuestas casi exactas.

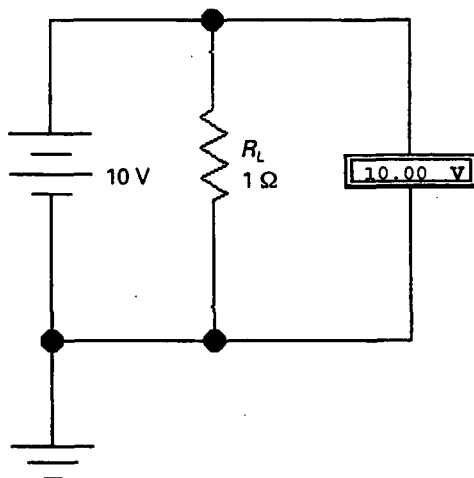
❑ Conclusión

La aproximación a emplear depende de lo que se esté intentando hacer. Si se están detectando averías, la aproximación más adecuada es la ideal. Para muchas situaciones, la segunda aproximación es la mejor elección porque es fácil de utilizar y no requiere un ordenador. Para aproximaciones superiores se debería usar un ordenador y un programa como EWB.

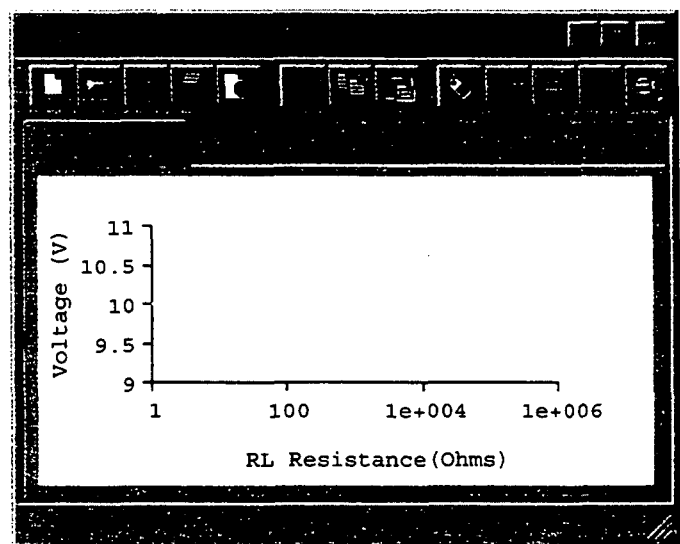
1-3. FUENTES DE TENSIÓN

Una **fuerza ideal de tensión continua** produce una tensión de salida que es constante. El ejemplo más sencillo de una fuerza ideal de tensión es una batería perfecta cuya resistencia interna vale cero. La Figura 1-1a muestra un circuito diseñado por ordenador usando EWB. Como se puede observar, una fuerza ideal de tensión se conecta a una resistencia de carga de $1\ \Omega$. El voltímetro marca 10 V, exactamente lo mismo que la fuerza de tensión.

La Figura 1-1b presenta una gráfica de la tensión en la carga en función de la resistencia de carga. Si se analiza dicha gráfica, la tensión en la carga permanece fija a 10 V cuando la resistencia de carga cambia de $1\ \Omega$ a $1\ \text{M}\Omega$.



(a)



(b)

Figura 1-1. a) Fuente ideal de tensión y resistencia de carga de $1\ \Omega$. b) La tensión en la carga es constante para todas las resistencias de carga.

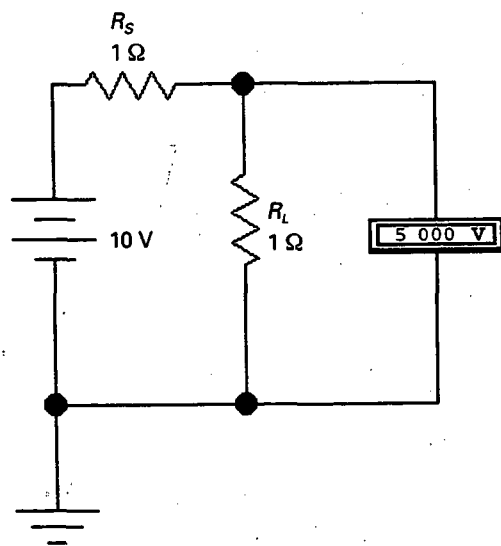
(lo mismo que $1e + 006$). Es decir, una fuente ideal de tensión continua produce una tensión en la carga constante, independientemente de lo pequeña o grande que sea la resistencia de carga. Con una fuente de tensión ideal, sólo la corriente por la carga cambia con la resistencia de carga.

□ Segunda aproximación

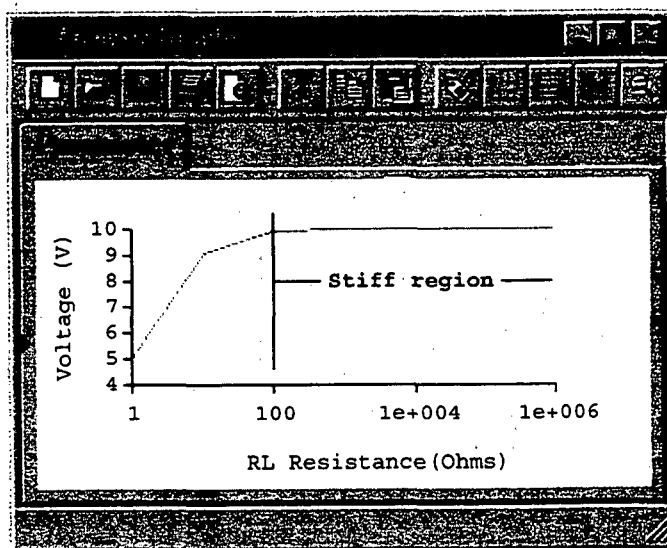
Una fuente ideal de tensión es un dispositivo teórico; no puede existir en la naturaleza. ¿Por qué? Cuando la resistencia de carga tiende a cero, la corriente por la carga tenderá a infinito. Ninguna fuente real de tensión puede producir una corriente infinita, ya que toda fuente real de tensión tiene cierta resistencia interna. La segunda aproximación de una fuente de tensión continua incluye la resistencia de carga.

La Figura 1-2a ilustra esta idea. Una resistencia de fuente R_S de $1\ \Omega$ está ahora en serie con una batería ideal. El voltímetro indica 5 V, debido a que la corriente por la carga es 10 V dividido por $2\ \Omega$, o 5 A. Cuando 5 A pasan a través de la resistencia de fuente de $1\ \Omega$, produce una caída interna de tensión de 5 V. Ésta es la razón de que la tensión en la carga sea sólo la mitad del valor ideal, con la otra mitad cayendo a través de la resistencia interna.

La Figura 1-2b muestra la gráfica EWB de la tensión en la carga en función de la resistencia de carga. En este caso, la tensión en la carga no se acerca al valor ideal hasta que la resistencia de carga es mucho mayor que la resistencia de fuente. Pero ¿qué significa *mucho mayor*? O lo que es lo mismo, ¿cuándo podemos ignorar la resistencia de carga?



(a)



(b)

Figura 1-2. a) La segunda aproximación incluye a la resistencia de fuente; b) la tensión en la carga es constante para resistencias de carga grandes.

8 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

□ Fuente de tensión constante

Ahora es el momento en que una nueva definición resultaría útil. Así pues, inventemos una. *Se ignorará la resistencia interna de la fuente cuando sea al menos 100 veces menor que la resistencia de carga.* Cualquier fuente que satisfaga esta condición recibe el nombre de **fente de tensión constante**. Matemáticamente se expresa de la forma siguiente:

$$\text{Fuente de tensión constante: } R_s < 0,01R_L \quad (1-1)$$

Esta fórmula define lo que identificamos por una *fente de tensión constante*. El límite de la desigualdad (donde $<$ se cambia por $=$) nos da la siguiente ecuación:

$$R_s = 0,01R_L$$

Resolviendo para la resistencia de carga se tiene la mínima resistencia de carga que se puede usar manteniendo todavía una fuente constante:

$$R_{L(\min)} = 100R_s \quad (1-2)$$

Es decir, la mínima resistencia de carga es igual a 100 veces la resistencia de fuente.

La Ecuación (1-2) es una derivación. Se ha empezado con la definición de una fuente de tensión constante y se ha operado para obtener la mínima resistencia de carga permitida con una fuente de tensión constante. Mientras que la resistencia de carga sea mayor que $100R_s$, la fuente de tensión es constante; cuando la resistencia de carga iguala el valor, el error de cálculo resultante de ignorar la resistencia de fuente es 1 por 100, suficientemente pequeño para desestimarlos en una segunda aproximación.

La Figura 1-3 muestra el gráfico de una fuente de tensión constante. La resistencia de carga tiene que ser mayor que $100R_s$ para que la fuente de tensión sea constante.

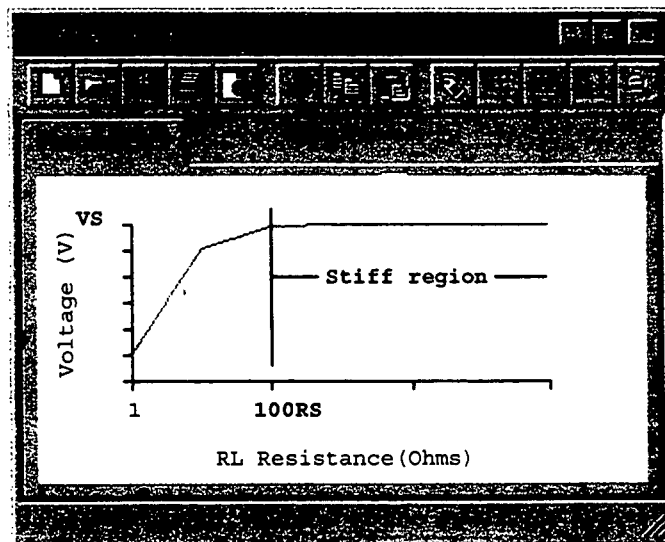


Figura 1-3. Las regiones de tensión constante se dan cuando la resistencia de carga es suficientemente grande.

EJEMPLO 1-1

La definición de una fuente de tensión constante se aplica tanto a fuentes alternas como a continuas. Supongamos que una fuente de tensión alterna tiene una resistencia de fuente de $50\ \Omega$. ¿Para qué resistencia de carga es constante la fuente?

SOLUCIÓN

Multiplicamos por 100 la resistencia de la fuente para obtener la mínima resistencia de carga:

$$R_L = 100R_s = 100(50\ \Omega) = 5\ \text{k}\Omega$$

Mientras la resistencia de carga sea mayor que $5\ \text{k}\Omega$, la tensión de la fuente es constante y podemos ignorar la resistencia interna de la fuente.

Una consideración final: usar la segunda aproximación para una fuente de tensión alterna es válido sólo a frecuencias bajas. A frecuencias altas, entran en juego factores adicionales tales como las inductancias de los cables y las capacitancias dispersas. Trataremos estos efectos de frecuencias altas en un capítulo posterior.

1-4. FUENTES DE CORRIENTE

Una fuente de tensión continua genera una tensión en la carga constante para diferentes resistencias. Una **fuentes de corriente continua** es diferente, *produce una corriente por la carga constante para diferentes resistencias de carga*. Un ejemplo de una fuente de corriente continua es una batería con una resistencia de fuente elevada, como se muestra en la Figura 1-4a. En este circuito, la resistencia de fuente es $1\ \text{M}\Omega$ y la corriente por la carga tiene un valor de

$$I_L = \frac{V_s}{R_s + R_L}$$

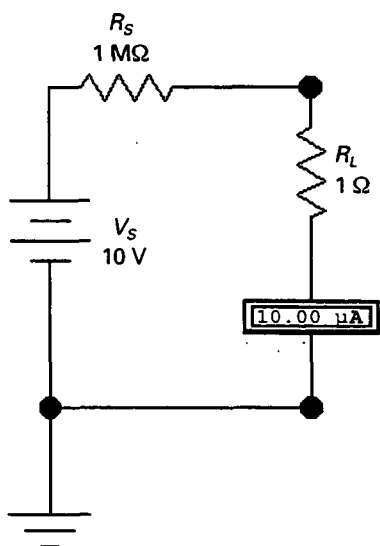
Como R_L es $1\ \Omega$, en la Figura 1-4a, la corriente por la carga tiene un valor de

$$I_L = \frac{10\ \text{V}}{1\ \text{M}\Omega + 1\ \Omega} = 10\ \mu\text{A}$$

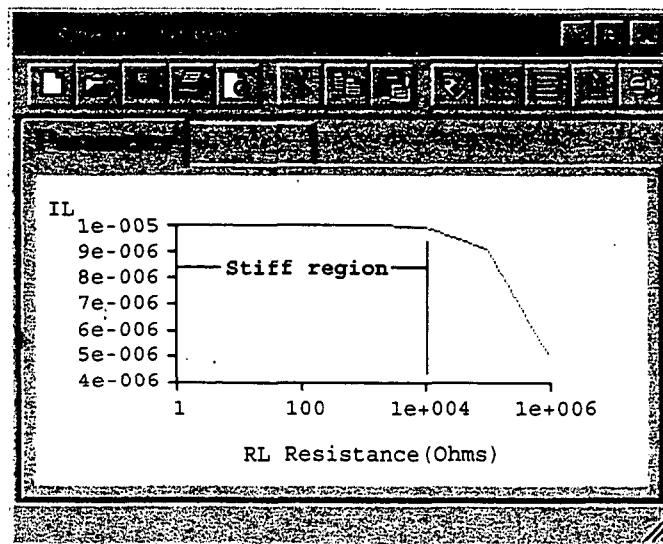
En estos cálculos, las resistencias de carga pequeñas apenas tienen efecto sobre la corriente por la carga.

La Figura 1-4b representa el efecto que produce variar la resistencia de carga desde $1\ \Omega$ hasta $1\ \text{M}\Omega$. En este caso, la corriente por la carga permanece constante a $10\ \mu\text{A}$ en un margen amplio. Sólo cuando la resistencia de carga es mayor que $10\ \text{k}\Omega$ se aprecia una caída en la corriente por la carga.

10 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA



(a)



(b)

Figura 1-4. a) Simulación de una fuente de corriente con una fuente de tensión continua y una resistencia grande;
b) la corriente por la carga es constante para resistencias de carga pequeñas.

❑ Fuente de corriente constante

Aquí viene otra definición que será útil, especialmente con circuitos semi-conductores. *Se ignorará la resistencia de fuente de una fuente de corriente cuando sea al menos 100 veces superior a la resistencia de carga.* Cualquier fuente que satisfaga esta condición es una **fuente de corriente constante**. Como definición:

$$\text{Fuente de corriente constante: } R_S > 100R_L \quad (1-3)$$

El límite superior es el peor caso:

$$R_S = 100R_L$$

Despejando la resistencia de carga se obtiene la máxima resistencia de carga que se puede utilizar teniendo todavía una fuente de corriente constante:

$$R_{L(\text{máx})} = 0,01R_S \quad (1-4)$$

Es decir, la máxima resistencia de carga es igual a 1/100 la resistencia de fuente.

La Ecuación (1-4) es una derivación, porque empezamos con la definición de una fuente de corriente constante y operamos para obtener la máxi-

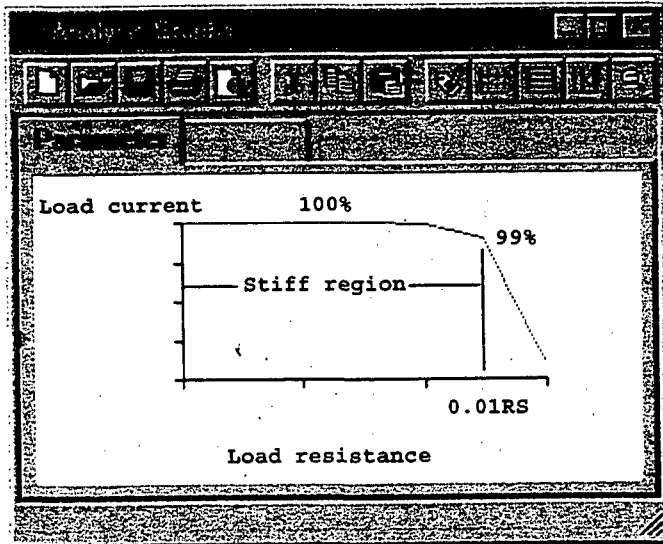


Figura 1-5. La región constante ocurre cuando la resistencia de carga es lo suficientemente pequeña.

ma resistencia de carga. Cuando la resistencia de carga iguala este valor, el error de cálculo es del 1 por 100, suficientemente pequeño para ser ignorado en una segunda aproximación.

La Figura 1-5 muestra la región en la que la fuente de corriente es constante, siempre y cuando la resistencia de carga sea menor que $0,01R_S$.

□ Símbolo eléctrico

La Figura 1-6a representa el símbolo eléctrico de una fuente de corriente ideal, la cual tiene una resistencia de fuente infinita. Esta aproximación ideal no puede existir en la naturaleza, pero sí lo puede hacer matemáticamente. Por tanto, es posible utilizar la fuente de corriente ideal para un análisis rápido de circuitos, como ocurre en detección de averías.

En la figura citada anteriormente se ha representado el símbolo de una fuente de corriente. Cuando aparece este símbolo significa que el dispositivo produce una corriente constante I_S .

Para entender mejor la idea se puede pensar en una fuente de corriente como una bomba que impulsa hacia fuera un número fijo de culombios por segundo. Por ello, se escuchan expresiones como: «la fuente de corriente bombea 5 mA a través de una resistencia de carga de 1 k Ω ».

La Figura 1-6b muestra la segunda aproximación. La resistencia interna está en paralelo con la fuente de corriente ideal, no en serie como ocurría en una fuente de tensión ideal.

Más adelante, en este capítulo, se expone el teorema de Norton, en el que se estudiará por qué la resistencia interna debe estar en paralelo con la fuente de corriente. La Tabla 1-1 ayuda a entender las diferencias entre una fuente de tensión y una fuente de corriente.

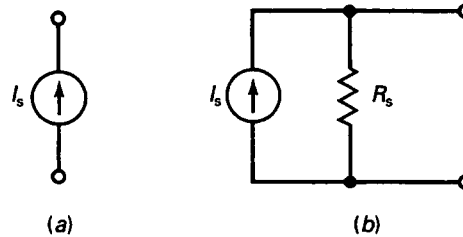


Figura 1-6. a) Símbolo esquemático de una fuente de corriente; b) segunda aproximación de una fuente de corriente.

Tabla 1-1. Propiedades de las fuentes de tensión y corriente

Valores	Fuente de tensión	Fuente de corriente
R_s	Típicamente baja	Típicamente alta
R_L	Mayor que $100R_s$	Menor que $0,01R_s$
V_L	Constante	Depende de R_L
I_L	Depende de R_L	Constante

EJEMPLO 1.2

Una fuente de corriente de 2 mA tiene una resistencia interna de 10 M Ω . Para que la fuente de corriente sea constante, ¿cuál es el rango aceptable para la resistencia de carga?

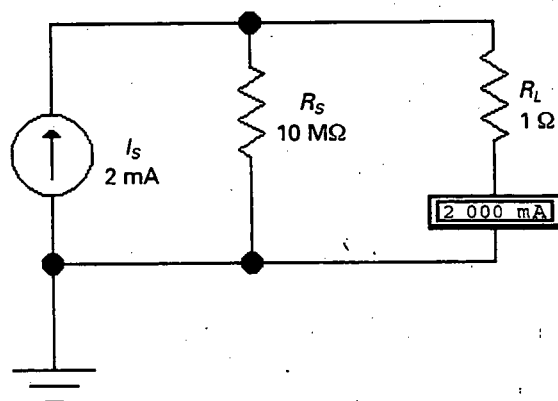
SOLUCION

Como esta es una fuente de corriente, la resistencia de carga tiene que ser pequeña comparada con la resistencia de fuente. Con la regla 100:1, la resistencia de carga máxima es

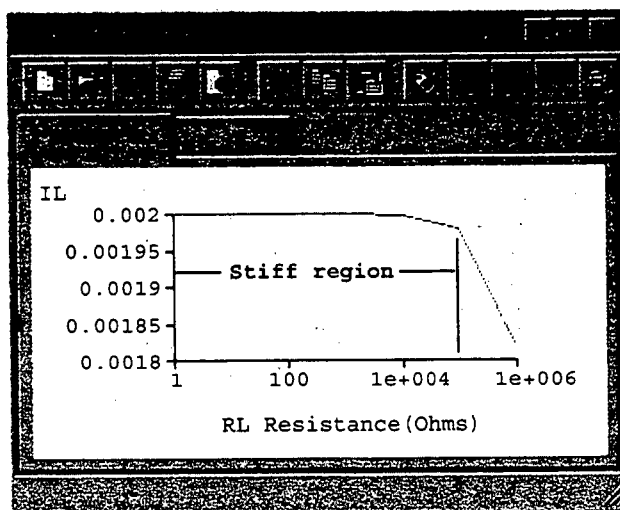
$$R_{L(\text{máx})} = 0,01(10 \text{ M}\Omega) = 100 \text{ k}\Omega$$

El rango donde la corriente por la carga es constante es una resistencia de carga cuyo valor oscila entre 0 y 100 k Ω .

La Figura 1-7 muestra la solución. En la Figura 1-7a una fuente de corriente de 2 mA está en paralelo con 10 M Ω y 1 Ω . El amperímetro mide una corriente por la carga de 2 mA. Cuando la resistencia de carga cambia de 1 Ω a 1 M Ω , como se aprecia en la Figura 1-7b, la fuente permanece fija hasta 100 k Ω . En este punto, la corriente por la carga baja un 1 por 100 respecto al valor ideal. Dicho de otra forma, el 99 por 100 de la corriente de la fuente pasa por la resistencia de carga, mientras que el 1 por 100 restante lo hace a través de la resistencia de fuente. A medida que la resistencia de carga se incrementa, la corriente de fuente continúa decreciendo.



(a)



(b)

Figura 1-7. Solución.

EJEMPLO 1-3

En la Figura 1-7a, ¿qué valor tiene la tensión en la carga cuando la resistencia de carga se iguala a 10 kΩ?

SOLUCIÓN

Como la fuente es constante para una resistencia de carga de 10 kΩ, la corriente por la carga es 2 mA. Con la ley de Ohm, la tensión en la carga es:

$$V_L = I_L R_L = (2 \text{ mA})(10 \text{ k}\Omega) = 20 \text{ V}$$

Cuando se analicen circuitos de transistores, se visualizarán estos como una fuente de corriente. En un circuito bien diseñado, el transistor actuará como una fuente de corriente constante, de tal modo que se podrá ignorar su resistencia interna. Después se calculará la tensión en la carga. Por ejemplo, si un transistor está bombeando 2 mA a través de una resistencia de carga de 10 kΩ, la tensión en la carga es 20 V.

1-5. TEOREMA DE THEVENIN

De vez en cuando alguien logra un gran adelanto en ingeniería y nos da a todos un nuevo impulso. Un ingeniero francés, M. L. Thevenin, hizo posible uno de estos saltos cuánticos cuando descubrió el teorema de circuitos que, en su honor, lleva su nombre: el *teorema de Thevenin*.

□ Definición de la tensión y resistencia Thevenin

Un teorema es una afirmación que se puede probar matemáticamente, hecho que lo diferencia de una definición o una ley. Así, lo clasificamos como una derivación. Recordemos las ideas estudiadas en cursos anteriores acerca del teorema de Thevenin. En la Figura 1-8a, la **tensión Thevenin** V_{TH} se define como la *tensión que aparece entre los terminales de la carga cuando se desconecta la resistencia de carga*. Debido a esto, la tensión Thevenin se denomina, a veces, **tensión en circuito abierto**. Matemáticamente tenemos:

$$\text{Tensión Thevenin: } V_{TH} = V_{CA} \quad (1-5)$$

La **resistencia Thevenin** es la *resistencia que un óhmetro mide a través de los terminales de la carga cuando todas las fuentes se anulan y la resistencia de carga se abre* (Fig. 1-8a):

$$\text{Resistencia Thevenin: } R_{TH} = R_{CA} \quad (1-6)$$

Con estas dos definiciones, Thevenin fue capaz de deducir el famoso teorema que lleva su nombre.

Hay que poner cierta atención para encontrar la resistencia Thevenin. Anular una fuente tiene diferentes significados para las fuentes de corriente y de tensión. Cuando se anula una fuente de tensión, se reemplaza efectivamente por un cortocircuito porque ésa es la forma de garantizar tensión cero cuando una corriente pasa a través de la fuente de tensión. Cuando se anula una fuente de corriente, se sustituye efectivamente por un circuito abierto porque es la forma de asegurar corriente cero cuando existe una tensión a través de la fuente de corriente. En resumen:

- Para anular una fuente de tensión, se reemplaza por un cortocircuito.
- Para invalidar una fuente de corriente, se sustituye por un circuito abierto.

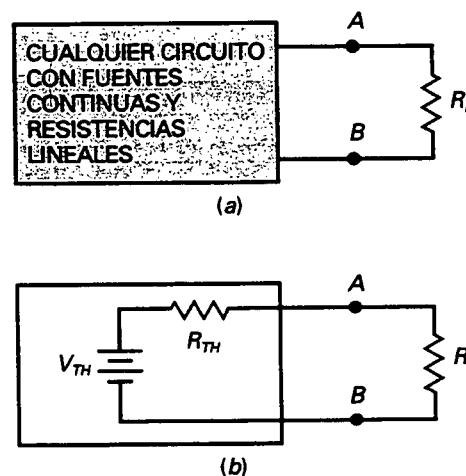


Figura 1-8. a) La caja negra tiene un circuito lineal en su interior. b) Circuito Thevenin.

□ La derivación

¿Cuál es el teorema de Thevenin? Si se observa la Figura 1-8a, la caja negra representada en ella puede contener cualquier circuito con fuentes continuas y resistencias lineales (una resistencia lineal no cambia con el incremento de la tensión). Thevenin fue capaz de probar que no importa lo complicado que sea el circuito dentro de dicha caja, ya que producirá exactamente la misma corriente por la carga que el circuito simple que aparece en la Figura 1-8b. Como derivación:

$$I_L = \frac{V_{TH}}{R_{TH} + R_L} \quad (1-7)$$

El teorema de Thevenin es una herramienta poderosa, y los ingenieros y los técnicos lo usan constantemente. La electrónica no estaría donde se encuentran actualmente de no haber sido por este teorema. No sólo simplifica los cálculos, sino que posibilita la explicación del funcionamiento de circuitos que serían imposibles de solucionar únicamente con las ecuaciones de Kirchhoff.

EJEMPLO 1-4

¿Cuáles son la tensión y la resistencia Thevenin en el circuito de la Figura 1-9a?

SOLUCIÓN

En primer lugar, calculamos la resistencia Thevenin. Para hacerlo hay que abrir la resistencia de carga, que es equivalente a desconectarla del circuito, como se muestra en la Figura 1-9b. Como 8 mA circulan a través de 6 kΩ en serie con 3 kΩ, aparecerán 24 V a través de 3 kΩ. Sin corriente a través de 4 kΩ, aparecerán 24 V a través de los terminales AB. Por tanto:

$$V_{TH} = 24 \text{ V}$$

El segundo punto es obtener la resistencia Thevenin, para lo que hay que anular una fuente continua, que es equivalente a reemplazarla por un cortocircuito, como se muestra en la Figura 1-9c. Si conectamos un ohmetro en los terminales AB de la Figura 1-9c, ¿qué se leerá?

Se leerá 6 kΩ. Porque mirando hacia atrás a los terminales AB con la batería cortocircuitada, el ohmetro ve 4 kΩ en serie con una conexión en paralelo de 3 kΩ y 6 kΩ. Podemos escribir:

$$R_{TH} = 4 \text{ k}\Omega + \frac{3 \text{ k}\Omega \cdot 6 \text{ k}\Omega}{3 \text{ k}\Omega + 6 \text{ k}\Omega} = 6 \text{ k}\Omega$$

De nuevo, necesitamos una definición. Las conexiones paralelas ocurren tan a menudo en electrónica que la mayoría de las perso-

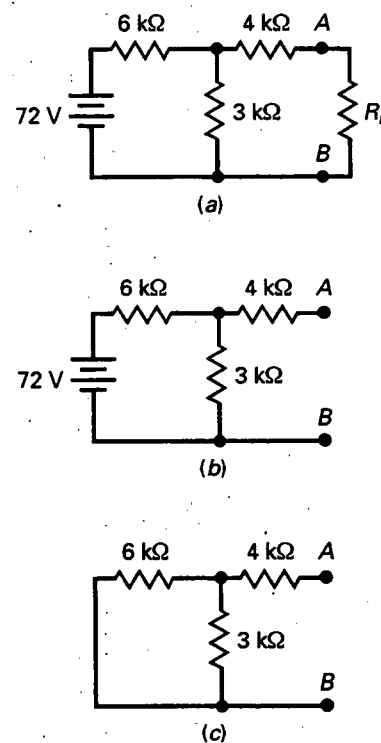


Figura 1-9. a) Circuito original; b) resistencia de carga abierta para obtener la tensión Thevenin; c) anulación de la fuente para obtener resistencia Thevenin.

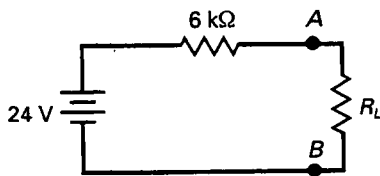


Figura 1-10. Circuito de Thevenin para la Figura 1-9a.

nas utilizan una notación simplificada para ellas. A partir de ahora, usaremos la siguiente anotación:

\parallel = en paralelo con

Siempre que veamos dos barras verticales en una ecuación, significa *en paralelo con*. En la industria, la ecuación anterior para la resistencia Thevenin se expresa de la siguiente manera:

$$R_{Th} = 4 \text{ k}\Omega + (3 \text{ k}\Omega \parallel 6 \text{ k}\Omega) = 6 \text{ k}\Omega$$

La mayoría de ingenieros y técnicos saben que las barras verticales significan *en paralelo con*. Así que ellos, automáticamente, usan la fórmula anterior para calcular la resistencia equivalente de $3 \text{ k}\Omega$ y $6 \text{ k}\Omega$.

En la Figura 1-10 está representado el circuito de Thevenin con una resistencia de carga. Si comparamos este circuito simple con el circuito original de la Figura 1-9a, se puede ver cómo se facilita el cálculo de la corriente por la carga para diferentes resistencias de carga. Si no es así, el siguiente ejemplo se lo hará.

EJEMPLO 1-5

En el circuito de la Figura 1-9a, ¿cuál es el valor de la corriente por la carga para los siguientes valores de R_L : $2 \text{ k}\Omega$, $6 \text{ k}\Omega$ y $18 \text{ k}\Omega$?

SOLUCIÓN

En vez de utilizar el circuito original de la Figura 1-9a, se puede emplear el circuito de Thevenin de la Figura 1-10. Cuando la resistencia de carga es $2 \text{ k}\Omega$:

$$I_L = \frac{24 \text{ V}}{6 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega} = 3 \text{ mA}$$

Con cálculos similares:

$$I_L = 2 \text{ mA} \text{ para } R_L = 6 \text{ k}\Omega$$

y

$$I_L = 1 \text{ mA} \text{ para } R_L = 18 \text{ k}\Omega$$

Si queremos apreciar realmente la potencia del teorema de Thevenin, debemos intentar calcular las anteriores corrientes usando el circuito original de la Figura 1-9a y cualquier otro método.

EJEMPLO 1-6

Una placa grapinada es un circuito construido a menudo con conexiones sin soldaduras dando poca importancia a la localización final de las partes para probar si es o no un diseño factible. Supongamos que tenemos el circuito de la Figura 1-11a grapinado en un banco de laboratorio. ¿Cómo mediríamos la tensión y la resistencia de Thevenin?

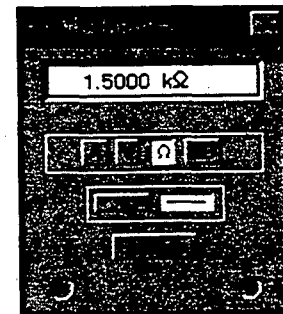
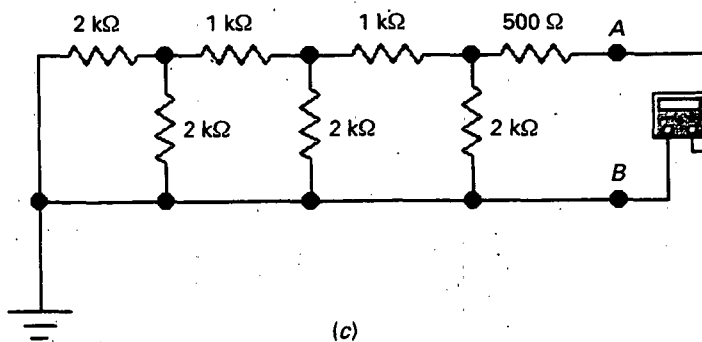
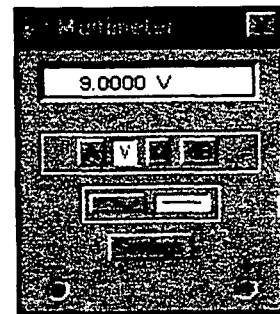
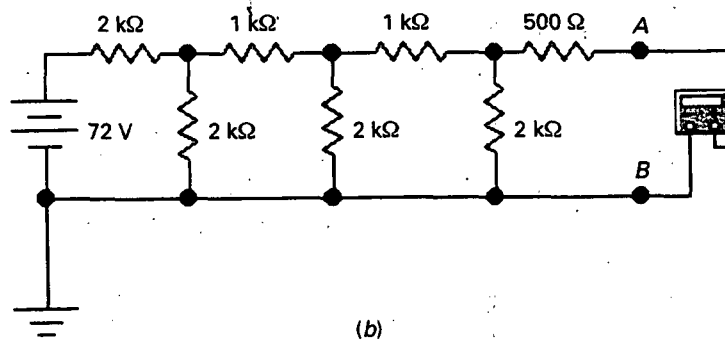
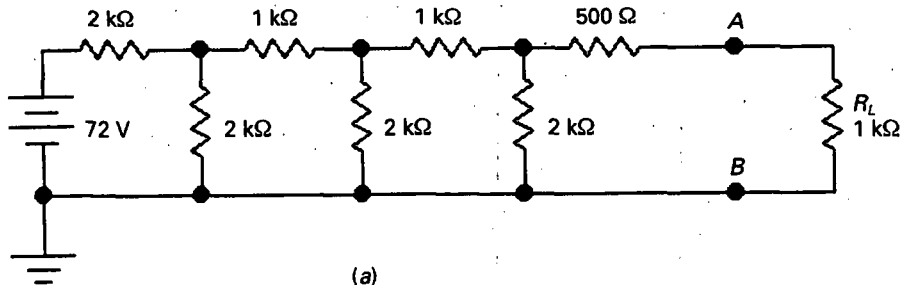


Figura 1-11. a) Circuito en un banco de laboratorio; b) midiendo la tensión de Thevenin; c) midiendo la resistencia de Thevenin.

SOLUCIÓN

Empecemos por reemplazar la resistencia de carga por un polímetro, como se muestra en la Figura 1-11b. Después de inicializar el polímetro para medir voltios debe indicar 9 V. Esta es la tensión de Thevenin. Ahora, reemplacemos la fuente continua por un corto-circuito (Fig. 1-11c). Fije el polímetro para que mida ohmios, e indicará 1.5 kΩ. Esta es la resistencia de Thevenin.

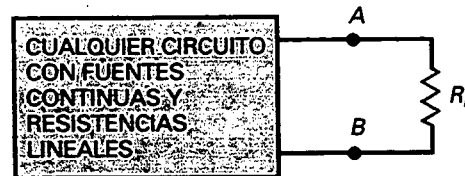
¿Hay alguna fuente de error en el método de medida anterior? Si, lo único que se debe vigilar es la impedancia de entrada del polímetro cuando se mide tensión. Como esta impedancia de entrada está entre los terminales de medida, una pequeña corriente circula a través del polímetro. Por ejemplo, si usted usa un polímetro de bobina móvil, la sensibilidad típica es 20 k Ω por voltio. En el rango de 10 V, el voltímetro tiene una resistencia de entrada de 200 k Ω . Esto cargará el circuito ligeramente y reducirá la tensión en la carga de 9 a 8.93 V.

Como regla general, la impedancia de salida del voltímetro debe de ser al menos 100 veces mayor que la resistencia de Thevenin. Entonces, el error de carga es menos de 1 por 100. Para evitar este error, use una entrada con un transistor de efecto de campo (field-effect transistor, FET) o un polímetro digital (digital multimeter, DMM) en lugar de un polímetro de bobina móvil. La impedancia de entrada de estos instrumentos es al menos 10 M Ω , lo que normalmente elimina el error de carga.

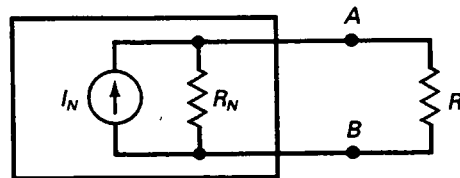
1-6. TEOREMA DE NORTON

Recordemos las siguientes ideas acerca del teorema de Norton estudiado en cursos anteriores. En la Figura 1-12a, la **corriente de Norton** I_N se define como la *corriente por la carga cuando la resistencia de carga se cortocircuita*. A causa de esto, la corriente de Norton se denomina a veces *corriente por la carga en cortocircuito*.

$$\text{Corriente de Norton: } I_N = I_{CC} \quad (1-8)$$



(a)



(b)

Figura 1-12. a) La caja negra tiene un circuito lineal en su interior; b) circuito Norton.

La **resistencia de Norton** es la *resistencia que un óhmetro mide en los terminales de la carga cuando todas las fuentes se anulan y la resistencia de carga está abierta.*

$$\text{Resistencia de Norton: } R_N = R_{CA} \quad (1-9)$$

Como la resistencia de Thevenin también es igual a R_{CA} , entonces se puede escribir la siguiente expresión:

$$R_N = R_{TH} \quad (1-10)$$

La derivación dice que la resistencia de Norton es igual a la de Thevenin. Si se calcula una resistencia de Thevenin de $10 \text{ k}\Omega$, inmediatamente se sabe que la resistencia de Norton tiene el mismo valor.

□ Idea básica

¿Cuál es el teorema de Norton? Obsérvese la Figura 1-12a. La caja negra representada en ella puede contener cualquier circuito con fuentes continuas y resistencias lineales. Norton probó que el circuito de la caja negra producirá exactamente la misma tensión en la carga que el circuito simple de la Figura 1-12b. El teorema de Norton se expresa de la siguiente forma:

$$V_L = I_N (R_N \parallel R_L) \quad (1-11)$$

Es decir, *la tensión en la carga es igual a la corriente de Norton multiplicada por la resistencia de Norton en paralelo con la resistencia de carga.*

Anteriormente se estudió que la resistencia de Norton era igual a la resistencia de Thevenin. Sin embargo, ha de notarse la diferencia en la localización de ambas resistencias: la de Thevenin está siempre en serie con una fuente de tensión, mientras que la de Norton se encuentra siempre en paralelo con una fuente de corriente.

Nota: Si está usando una corriente eléctrica se debe tener presente el siguiente hecho: en la industria, la flecha dentro de la fuente de corriente se dibuja casi siempre en la dirección de la corriente convencional. La excepción es una fuente de corriente dibujada con una flecha en trazo discontinuo en lugar de una de trazo sólido. En este caso, la fuente bombea electrones en la dirección de la flecha discontinua.

□ La derivación

El teorema de Norton se puede deducir del **principio de dualidad**, que establece que para cualquier teorema de circuitos eléctricos hay un teorema dual (opuesto) en el que se reemplazan las cantidades originales por cantidades duales. A continuación se presenta una breve lista de estas cantidades:

Tensión	←————→	Corriente
Fuente de tensión	←————→	Fuente de corriente
Serie	←————→	Paralelo
Resistencia en serie	←————→	Resistencia en paralelo

La Figura 1-13 resume los principios de dualidad tal como se aplican a los circuitos de Thevenin y de Norton, lo que significa que podemos utilizar cualquiera de los circuitos en nuestros cálculos. Como se verá más adelante,

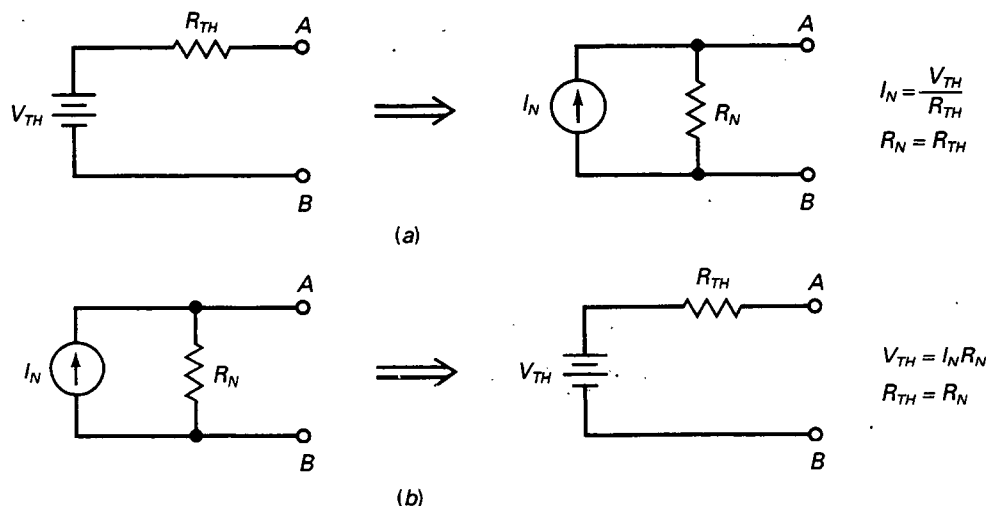


Figura 1-13. Principio de dualidad: el teorema de Thevenin implica el teorema de Norton y viceversa.
a) Conversión Thevenin a Norton; b) conversión Norton a Thevenin.

ambos circuitos equivalentes son útiles. Algunas veces es más fácil utilizar Thevenin, en otras ocasiones empleamos Norton, todo va en función del problema específico que se haya planteado. La Tabla 1-2 resume los pasos para obtener los valores de Thevenin y de Norton.

□ Relación entre el circuito de Norton y el de Thevenin

Ya sabemos que la resistencia Thevenin y Norton son de igual valor pero de diferente localización: la resistencia Thevenin está en serie con fuentes de tensión, y la resistencia Norton está en paralelo con fuentes de corriente.

Tabla 1-2. Valores de Thevenin y Norton

Proceso	Thevenin	Norton
Paso 1	Abrir la resistencia de carga.	Cortocircuitar la resistencia de carga.
Paso 2	Calcular o medir la tensión en circuito abierto. Ésta es la tensión Thevenin.	Calcular o medir la corriente en cortocircuito. Ésta es la corriente Norton.
Paso 3	Cortocircuitar las fuentes de tensión y abrir las fuentes de corriente.	Cortocircuitar las fuentes de tensión, abrir las fuentes de corriente y abrir la resistencia de carga.
Paso 4	Calcular o medir la resistencia en circuito abierto. Ésta es la resistencia Thevenin.	Calcular o medir la resistencia en circuito abierto. Ésta es la resistencia Norton.

Se pueden derivar dos relaciones más de la forma siguiente: se convierte cualquier circuito de Thevenin a un circuito de Norton, como se muestra en la Figura 1-13a. La prueba es directa, se cortocircuitan los terminales AB del circuito Thevenin y se obtiene la corriente Norton:

$$I_N = \frac{V_{TH}}{R_{TH}} \quad (1-12)$$

Esta nueva fórmula dice que *la corriente de Norton es igual a la tensión de Thevenin dividida por la resistencia de Thevenin.*

Del mismo modo, es posible convertir cualquier circuito Norton en un circuito Thevenin, tal como se aprecia en la Figura 1-13b. La tensión en circuito abierto es:

$$V_{TH} = I_N R_N \quad (1-13)$$

con lo que *la tensión de Thevenin es igual a la corriente de Norton multiplicada por la resistencia de Norton.*

La Figura 1-13 resume las ecuaciones para convertir cualquier circuito en otro equivalente.

EJEMPLO 1-7

Supongamos que hemos reducido un circuito complicado al circuito de Thevenin que se muestra en la Figura 1-14a. ¿Cómo podemos convertir este en un circuito Norton?

SOLUCIÓN

Usamos la Ecuación (1-12) para obtener el siguiente resultado:

$$I_N = \frac{10 \text{ V}}{2 \text{ k}\Omega} = 5 \text{ mA}$$

La Figura 1-14 presenta el circuito de Norton. Aunque se olvide la Ecuación (1-12) se puede resolver el problema empleando la ley de Ohm; para lo que deberíamos seguir los pasos que se citan a continuación: observemos la Figura 1-14a e imaginemos un corto-

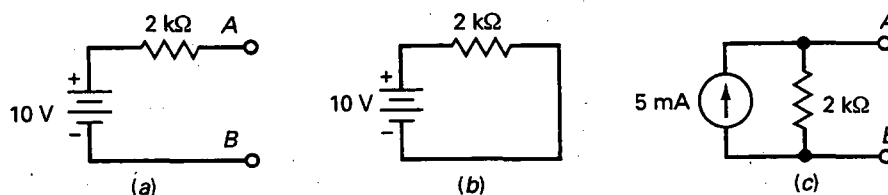


Figura 1-14. Calculando la corriente de Norton.

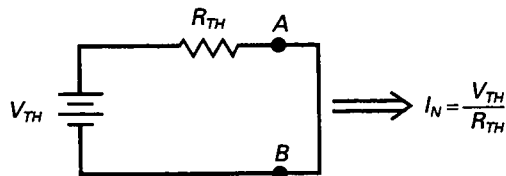
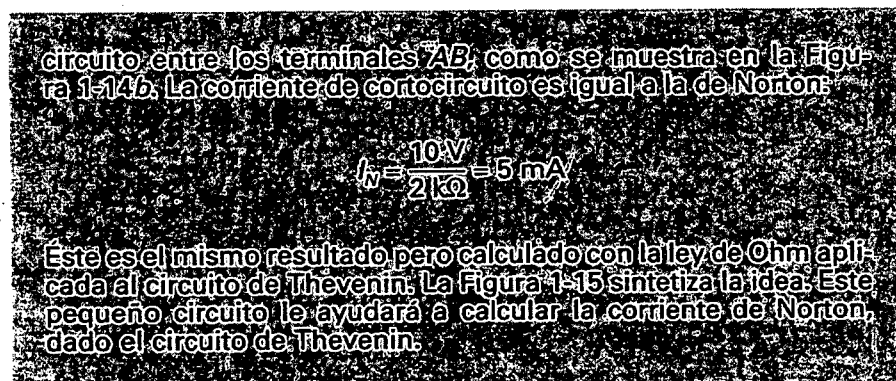


Figura 1-15. Una ayuda para calcular la corriente de Norton.



1-7. DETECCIÓN DE AVERÍAS

Detectar averías significa descubrir por qué un circuito no está comportándose como debería. Las averías más comunes son los circuitos abiertos y los cortocircuitos. Dispositivos como los transistores pueden quedar en circuito abierto y en cortocircuito de muchas maneras. La superación del límite de potencia máxima de un transistor es una de las formas de destruirlo.

Las resistencias se convierten en circuitos abiertos cuando la potencia que disipan es excesiva. Por otro lado, se puede obtener involuntariamente una resistencia en cortocircuito, como se indica a continuación. Durante el horneado y soldadura de tarjetas de circuito impreso, una gota involuntaria de soldadura puede conectar dos pistas cercanas. Esta situación se denomina *punto de soldadura*; éste cortocircuita cualquier dispositivo entre las dos pistas. Por el contrario, una mala soldadura significa la no conexión en la mayoría de los casos. Esto se conoce como una unión *de soldadura fría* e implica que el dispositivo se encuentra en circuito abierto.

Además de los circuitos abiertos y cortocircuitos hay otras muchas posibilidades de avería. Por ejemplo, aplicar temporalmente demasiado calor a una resistencia puede cambiar de forma permanente el valor de la resistencia en un gran porcentaje. Si el valor de la resistencia es crítico, el circuito puede no funcionar adecuadamente después del daño térmico.

Por otro lado existe la pesadilla del detector de averías: el problema intermitente. Este tipo de problemas es muy difícil de aislar porque aparece y desaparece. Puede ser una unión de soldadura fría que alternativamente hace y rompe un contacto, o un cable de conexión flojo, o cualquier problema similar que cause un funcionamiento discontinuo.

□ Un dispositivo en circuito abierto

Recordemos siempre las dos características de un dispositivo en circuito abierto:

- La corriente a través de un dispositivo en circuito abierto es cero.
- La tensión es desconocida.

La primera proposición es verdadera, ya que un dispositivo abierto tiene una resistencia infinita. No puede existir corriente por una resistencia infinita. La segunda proposición es cierta, ya que según la ley de Ohm:

$$V = IR = (0)(\infty)$$

En nuestra ecuación, 0 por ∞ es, matemáticamente, indeterminado. Tiene que averiguar cuál es la tensión mirando el resto del circuito.

□ Un dispositivo en cortocircuito

Un dispositivo en cortocircuito es exactamente el concepto opuesto a un dispositivo en circuito abierto. Se deben recordar siempre estas dos características de un dispositivo en cortocircuito:

- La tensión en un cortocircuito es cero.
- La corriente es desconocida.

La primera proposición es cierta, porque un dispositivo cortocircuitado tiene resistencia cero. No puede existir tensión en una resistencia cero. La segunda proposición es verdadera, ya que según la ley de Ohm:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{0}{0}$$

Matemáticamente, cero dividido por cero está indeterminado, por lo que debe averiguar cuál es la corriente estudiando el resto del circuito.

□ Procedimiento

Normalmente, las tensiones se miden con respecto a masa. A partir de estas mediciones y de los conocimientos de electricidad básica, generalmente pueden deducirse la mayoría de las averías más comunes. Después de que se ha aislado el componente más sospechoso, se puede desoldar o desconectar dicho componente y utilizar un óhmetro u otro instrumento para confirmar si la sospecha era cierta.

□ Valores correctos

En la Figura 1-16 se tiene un divisor de tensión constante constituido por las resistencias R_1 y R_2 a la cual están conectadas R_3 y R_4 en serie. Antes de poder detectar las averías en este circuito, hay que conocer las tensiones correctas. Por tanto, lo primero que hay que hacer es calcular los valores de

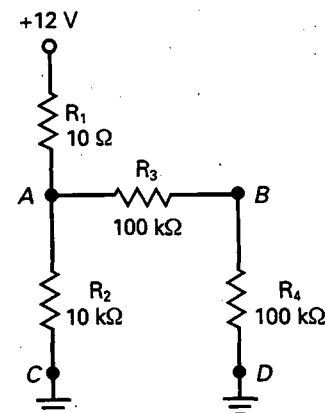


Figura 1-16. Divisor de tensión y carga usados en la exposición de detección de averías.

V_A y V_B . El primero es la tensión entre el punto A y masa. El segundo es la tensión entre el punto B y masa. Como R_1 y R_2 son mucho menores que R_3 y R_4 ($10\ \Omega$ frente a $100\ \text{k}\Omega$), la tensión constante en el punto A es aproximadamente de +6 V. Además, como R_3 y R_4 son iguales, la tensión en el punto B es aproximadamente de +3 V. Si el circuito funcionara correctamente, se medirían 6 V entre el punto A y masa, y 3 V entre el punto B y masa. Estas dos tensiones son el primer dato de la Tabla 1-3.

□ R_1 abierto

¿Qué sucede con las tensiones cuando R_1 está en circuito abierto? Como no puede circular corriente por la resistencia R_1 , si está en circuito abierto, tampoco puede circular corriente por la resistencia R_2 . Según la ley de Ohm, la tensión en R_2 es cero. Por tanto, $V_A = 0$ y $V_B = 0$, como se muestra en la Tabla 1-3 para R_1 abierta.

□ R_2 abierto

¿Qué ocurre con las tensiones si R_2 está en circuito abierto? Como no circula corriente por R_2 , la tensión en el punto A es la tensión de alimentación. Como R_1 es mucho menor que R_3 y R_4 , la tensión en el punto A es de aproximadamente 12 V. Como R_3 y R_4 son iguales, la tensión en el punto B pasa a ser de 6 V. Éste es el motivo por el que aparecen en la Tabla 1-3 los valores de $V_A = 12\ \text{V}$ y $V_B = 6\ \text{V}$ cuando R_2 está en circuito abierto.

□ Otros problemas

Si la masa C está en circuito abierto, no puede pasar corriente por R_2 . Es como si R_2 estuviese en circuito abierto. Por tal causa, aparecen los valores $V_A = 12\ \text{V}$ y $V_B = 6\ \text{V}$ en la Tabla 1-3.

Sería conveniente que se determinasen los datos restantes de la Tabla 1-3, asegurándose de que se comprende por qué aparece cada tensión para la avería indicada.

Tabla 1-3. Averías y pistas

Avería	V_A (V)	V_B (V)
Sin problemas	6	3
R_1 abierta	0	0
R_2 abierta	12	6
R_3 abierta	6	0
R_4 abierta	6	6
C abierto	12	6
D abierto	6	6
R_1 en corto	12	6
R_2 en corto	0	0
R_3 en corto	6	6
R_4 en corto	6	0

EJEMPLO 1-8

En la Figura 1-16 se mide $V_A = 0$ y $V_B = 0$. ¿Cuál es la avería de este circuito?

SOLUCIÓN

Observemos la Tabla 1-3. Como podemos ver hay dos problemas posibles: R_1 abierta o R_2 cortocircuitada. Ambos producen una tensión cero en los puntos A y B. Para aislar esta cuestión, podemos desconectar R_1 y medirlo. Si medimos el circuito abierto ya hemos encontrado el problema. Y si el valor es correcto, entonces R_2 es el problema.

EJEMPLO 1-9

¿Cuál es el problema si $V_A = 12$ V y $V_B = 6$ V en el circuito de la Figura 1-16?

SOLUCIÓN

La Tabla 1-3 muestra tres averías posibles: R_2 abierta, C abierta, o R_1 cortocircuitada. Para aislarla, podemos desconectar R_2 y medirlo. Si mide circuito abierto ya hemos dado con el fallo. Y si mide bien, entonces determinamos R_1 . Si su valor es cero ya hemos localizado el problema. Si mide bien entonces la conexión C es la avería.

EJEMPLO 1-10

Observemos la cuestión relativa a la detección de averías de la Figura 1-22 (al final de la sección de problemas). Tiene un circuito en la parte superior similar al que se ha resumido en la Tabla 1-3. Los valores de los componentes del circuito son diferentes, por lo que las tensiones también lo serán. ¿Cómo se emplea el detector de averías (T-shooter) para medir las tensiones A, B y E cuando el circuito funciona correctamente?

SOLUCIÓN

En la Figura 1-22, la primera tabla indica «sin problemas». Esta es la que se debe emplear cuando se deseen medir tensiones correctas. Para medir la tensión en el punto A, lea el dato adyacente a V_A que es B5. A este dato (B5) se le llama *muestra*. Trasládese a la tabla grande denominada «Tensiones» y lea el valor de la muestra B5. Busque la fila B y la columna 5. Deberá leer 4, lo que significa 4 V. Esta es la tensión en el punto A.

De forma similar, V_B tiene una muestra E2. En la tabla grande, esta se corresponde con una tensión de 2 V. Finalmente, la tensión de la fuente V_E tiene una muestra de valor C4. La tensión correspondiente es 12 V.

AYUDAS AL ESTUDIO

RESUMEN**Sección 1-1. Los tres tipos de fórmulas**

Una *definición* es una fórmula inventada para un nuevo concepto. Una *ley* es una fórmula para una relación de la naturaleza. Una *derivación* es una fórmula producida matemáticamente.

Sección 1-2. Aproximaciones

Las aproximaciones se utilizan ampliamente en la industria. La aproximación ideal se emplea para detección de averías. La segunda aproximación es útil para cálculos preliminares en los circuitos. Las aproximaciones superiores se usan con ordenadores.

Sección 1-3. Fuentes de tensión

Una fuente ideal de tensión no tiene resistencia interna. La segunda aproximación de una fuente de tensión tiene una resistencia interna en serie con la fuente. Una fuente de tensión constante se define como aquella que tiene una resistencia interna que es al menos 100 veces menor que la resistencia de carga.

Sección 1-4. Fuentes de corriente

Una fuente ideal de corriente tiene una resistencia interna infinita. La segunda aproximación de una fuente de corriente posee una resistencia interna grande en paralelo con la fuente. Una *fuerza de corriente constante* se define como aquella cuya resistencia interna es, al menos, 100 veces mayor que la resistencia de carga.

Sección 1-5. Teorema de Thevenin

La tensión de Thevenin se define como la tensión en la carga cuando la resistencia de carga está desconectada. La resistencia Thevenin es la resistencia que un óhmetro mediría con una carga abierta y todas las fuentes anuladas. Thevenin probó que un circuito equivalente de Thevenin puede producir la misma corriente por la carga que cualquier otro circuito con fuentes y resistencias lineales.

Sección 1-6. Teorema de Norton

La resistencia Norton tiene el mismo valor que la resistencia Thevenin. La corriente Norton es igual a la corriente por la carga cuando la resistencia de carga

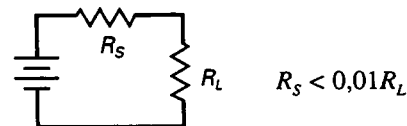
está en cortocircuito. Norton demostró que un circuito equivalente de Norton produce la misma tensión en la carga que cualquier otro circuito con fuentes y resistencias lineales. La corriente de Norton es equivalente a la tensión de Thevenin dividida por la resistencia de Thevenin.

Sección 1-7. Detección de averías

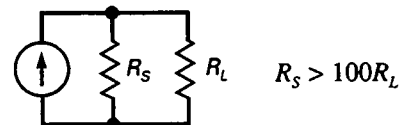
Los problemas más comunes son los cortocircuitos, los circuitos abiertos y los problemas intermitentes. Un cortocircuito siempre tiene una tensión cero en él; la corriente a través de un cortocircuito debe calcularse observando el resto del mismo. La corriente que atraviesa un circuito abierto es nula en todo momento; la tensión en un circuito abierto se debe calcular examinando el resto del circuito. Un problema intermitente es aquel que va y viene y requiere mucha paciencia y lógica para detectarlo.

DEFINICIONES

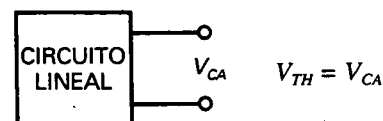
(1-1) Fuente de tensión constante:



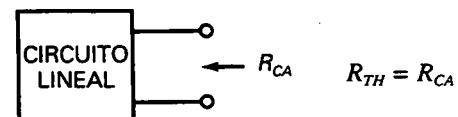
(1-3) Fuente de corriente constante:



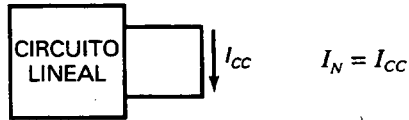
(1-5) Tensión de Thevenin:



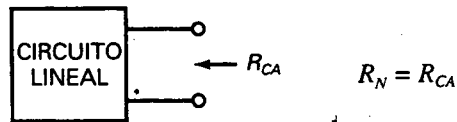
(1-6) Resistencia Thevenin:



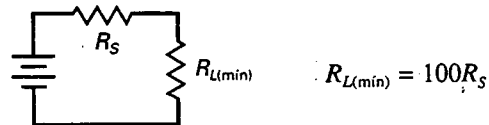
(1-8) Corriente de Norton:



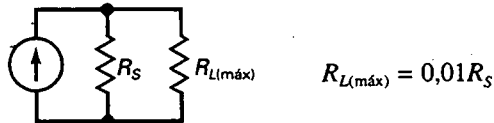
(1-9) Resistencia Norton:

**DERIVACIONES**

(1-2) Fuente de tensión constante:



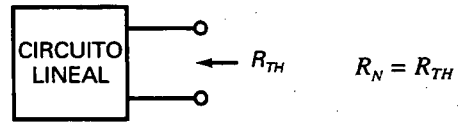
(1-4) Fuente de corriente constante:



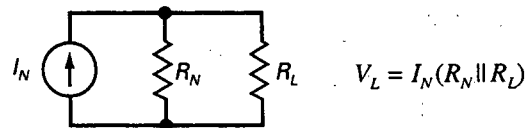
(1-7) Teorema de Thevenin:



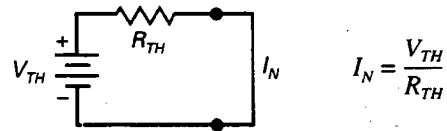
(1-10) Resistencia de Norton:



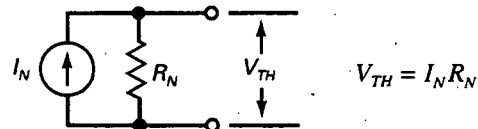
(1-11) Teorema de Norton:



(1-12) Corriente de Norton:



(1-13) Tensión de Thevenin:

**EJERCICIOS PARA EL ALUMNO****CUESTIONES**

- Una fuente ideal de tensión tiene
 - Resistencia interna nula
 - Resistencia interna infinita
 - Una tensión dependiente de la carga
 - Una corriente dependiente de la carga
- Una fuente real de tensión posee
 - Resistencia interna nula
 - Resistencia interna infinita
 - Resistencia interna pequeña
 - Resistencia interna grande
- Si la resistencia de carga es de 1 kΩ, la fuente de tensión constante tiene una resistencia de
 - Al menos 10 Ω
 - Menos de 10 Ω
 - Más de 100 kΩ
 - Menos de 100 kΩ
- Una fuente ideal de corriente posee
 - Resistencia interna nula
 - Resistencia interna infinita
 - Una tensión dependiente de la carga
 - Una corriente dependiente de la carga
- Una fuente real de corriente tiene
 - Resistencia interna nula
 - Resistencia interna infinita
 - Resistencia interna pequeña
 - Resistencia interna grande

28 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

6. Si la resistencia de carga es de $1\text{ k}\Omega$, el valor de la resistencia de la fuente constante es de
 - a) Al menos $10\ \Omega$
 - b) Menos de $10\ \Omega$
 - c) Más de $100\text{ k}\Omega$
 - d) Menos de $100\text{ k}\Omega$
7. La tensión Thevenin es la misma que
 - a) La tensión en la carga en cortocircuito
 - b) La tensión en la carga en circuito abierto
 - c) La tensión de la fuente ideal
 - d) La tensión de Norton
8. La resistencia Thevenin es igual en valor a
 - a) La resistencia de carga
 - b) La mitad de la resistencia de carga
 - c) La resistencia interna de un circuito Norton
 - d) La resistencia en circuito abierto
9. Para hallar la tensión Thevenin hay que
 - a) Cortocircuitar la resistencia de carga
 - b) Abrir la resistencia de carga
 - c) Cortocircuitar la fuente de tensión
 - d) Abrir la fuente de tensión
10. Para hallar la corriente Norton es necesario
 - a) Cortocircuitar la resistencia de carga
 - b) Abrir la resistencia de carga
 - c) Cortocircuitar la fuente de tensión
 - d) Abrir la fuente de tensión
11. En ocasiones la corriente Norton recibe el nombre de
 - a) Corriente por la carga en cortocircuito
 - b) Corriente por la carga en circuito abierto
 - c) Corriente Thevenin
 - d) Tensión Thevenin
12. Un puente de soldadura puede causar
 - a) Un cortocircuito
 - b) Un circuito abierto
 - c) Es útil en algunos circuitos
 - d) Siempre tiene resistencias altas
13. Una soldadura fría
 - a) Muestra una buena técnica de soldadura
 - b) Normalmente produce un circuito abierto
 - c) Puede causar un problema intermitente
 - d) Siempre tiene una resistencia baja
14. Una resistencia en circuito abierto provoca
 - a) Una corriente infinita a través de ella
 - b) Una tensión nula entre sus bornas
 - c) Una tensión infinita entre sus bornas
 - d) Una corriente nula a través de ella
15. Una resistencia cortocircuitada ocasiona
 - a) Una corriente infinita a través de ella
 - b) Una tensión nula entre sus bornas
 - c) Una tensión infinita entre sus bornas
 - d) Una corriente nula a través de ella
16. Una fuente ideal de tensión y una resistencia interna es un ejemplo de
 - a) Una aproximación ideal
 - b) La segunda aproximación
 - c) Aproximación superior
 - d) Un modelo exacto
17. Considerar un cable de conexión como un conductor con resistencia nula es un modelo de
 - a) Una aproximación ideal
 - b) La segunda aproximación
 - c) Aproximación superior
 - d) Un modelo exacto
18. La tensión de salida en una fuente ideal de tensión es
 - a) Cero
 - b) Constante
 - c) Dependiente del valor de la resistencia de carga
 - d) Dependiente de la resistencia interna
19. La corriente de salida de una fuente ideal de corriente toma el valor
 - a) Cero
 - b) Constante
 - c) Dependiente del valor de la resistencia de carga
 - d) Dependiente de la resistencia interna
20. El teorema de Thevenin permite sustituir un circuito complicado conectado a una carga por una
 - a) Fuente ideal de tensión en paralelo con una resistencia
 - b) Fuente ideal de corriente en paralelo con una resistencia
 - c) Fuente ideal de tensión en serie con una resistencia
 - d) Fuente ideal de corriente en serie con una resistencia
21. El teorema de Norton hace posible reemplazar un circuito complejo conectado a una carga por una
 - a) Fuente ideal de tensión en paralelo con una resistencia
 - b) Fuente ideal de corriente en paralelo con una resistencia
 - c) Fuente ideal de tensión en serie con una resistencia
 - d) Fuente ideal de corriente en serie con una resistencia
22. Una manera de poner un dispositivo en cortocircuito es
 - a) Con una soldadura fría
 - b) Con un puente de soldadura
 - c) Desconectándolo
 - d) Abriendo la resistencia
23. Las derivaciones son
 - a) Descubrimientos
 - b) Invenciones
 - c) Producidas matemáticamente
 - d) Siempre denominadas teoremas

PREGUNTAS DE ENTREVISTA DE TRABAJO

Una entrevista de trabajo refleja rápidamente si sus conocimientos son superficiales o si realmente comprende la electrónica. Los entrevistadores no siempre preguntan cuestiones claras y concisas. Algunas veces omiten datos para ver cómo maneja el problema. Cuando se entrevista para un trabajo, el entrevistador puede preguntarle cosas como las siguientes. Preferiblemente conteste estas cuestiones después de haber resuelto algunos de los apartados de la sección «Problemas».

1. ¿Cuál es la diferencia entre una fuente de tensión y una fuente de corriente?
2. ¿Cuándo tiene que incluir una resistencia de fuente en sus cálculos de una corriente por la carga?
3. Si un dispositivo se modela como una fuente de corriente, ¿qué puede decir acerca de la resistencia de carga?
4. ¿Qué significa para usted una fuente constante?
5. Tengo un circuito grapinado en mi banco de laboratorio. Dígame qué medidas puedo tomar para obtener la resistencia de Thevenin y la tensión de Thevenin.
6. Hay una caja negra en mi banco de laboratorio. ¿Es una fuente de tensión o una fuente de corriente?
7. ¿Cómo se relacionan la resistencia de Thevenin y «los amperios fríos» de una batería de coche?
8. Alguien le dice que una fuente de tensión está fuertemente cargada. ¿Qué cree que significa eso?
9. ¿Qué aproximación usa normalmente un técnico cuando realiza procedimientos iniciales de detección de averías? ¿Por qué?
10. Cuando se están buscando averías de un circuito electrónico, usted mide una tensión continua de 9,5 V en el punto de medida cuando el esquema del circuito dice que debe medir 10 V. ¿Qué infiere usted de esta lectura? ¿Por qué?
11. ¿Cuáles son algunas de las razones para usar un circuito de Thevenin o de Norton?
12. ¿Qué valor tienen el teorema de Norton y Thevenin en un banco de pruebas?

PROBLEMAS

Sección 1-3. Fuentes de tensión

- 1-1. Suponga que una fuente de tensión tiene una tensión ideal de 12 V y una resistencia interna de 0,5 Ω . ¿Para qué valores de carga la fuente de tensión será constante?

- 1-2. Una resistencia de carga puede variar de 270 Ω a 100 k Ω . Si una fuente constante de tensión excita a esta resistencia de carga, ¿cuál es la resistencia interna de la fuente?
- 1-3. Una pila para linterna tiene una resistencia interna de 1 Ω . ¿Para qué valores de la resistencia de carga la pila será constante?
- 1-4. Una batería para automóvil tiene una resistencia interna de 0,06 Ω . ¿Para qué valores de la resistencia de carga la batería será constante?
- 1-5. La resistencia interna de una fuente de tensión es igual a 0,05 Ω . ¿Cuál es la caída de tensión en esta resistencia cuando circula por ella una corriente de 2 A?
- 1-6. En la Figura 1-17 la tensión ideal es de 9 V y la resistencia interna es de 0,4 Ω . Si la resistencia de carga vale cero, ¿qué valor tiene la corriente por la carga?

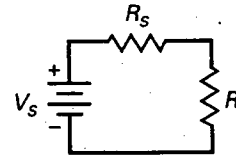


Figura 1-17

Sección 1-4. Fuentes de corriente

- 1-7. Suponga que una fuente de corriente tiene una corriente ideal de 10 mA y una resistencia interna de 20 M Ω . ¿Para qué valores de la resistencia de carga la fuente de corriente será constante?
- 1-8. Una resistencia de carga puede variar desde 270 Ω hasta 100 k Ω . Si una fuente constante de corriente excita esta resistencia de carga, ¿cuál es la resistencia interna de la fuente?
- 1-9. Una fuente de corriente tiene una resistencia interna de 100 k Ω . ¿Cuál es la mayor resistencia de carga posible si la fuente de corriente debe ser constante?
- 1-10. En la Figura 1-18 la corriente ideal es de 10 mA y la resistencia interna es de 100 k Ω . Si la resistencia de carga es nula, ¿cuál es la corriente por la carga?

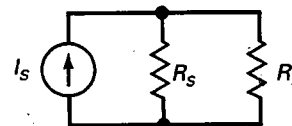


Figura 1-18

- 1-11. En el circuito de la Figura 1-18 la corriente ideal es de 5 mA y la resistencia interna es de

30 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

250 k Ω . Si la resistencia de carga es de 10 k Ω , ¿cuál es la corriente por la carga? ¿Es ésta una fuente de corriente constante?

Sección 1-5. Teorema de Thevenin

- 1-12. ¿Cuál es la tensión Thevenin en el circuito de la Figura 1-19? ¿Cuál es la resistencia Thevenin?

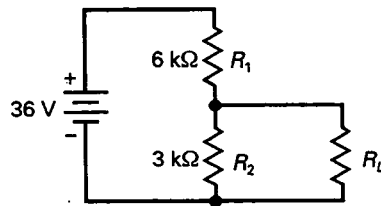


Figura 1-19

- 1-13. Use el teorema de Thevenin para calcular la corriente por la carga en el circuito de la Figura 1-19 para cada una de las siguientes resistencias de carga: 0,1 k Ω , 2 k Ω , 3 k Ω , 4 k Ω , 5 k Ω y 6 k Ω .
- 1-14. El valor de la fuente de tensión en la Figura 1-19 disminuye a 12 V. ¿Qué sucede con la tensión Thevenin? ¿Y con la resistencia Thevenin?
- 1-15. Si en la Figura 1-19 se duplica el valor de todas las resistencias, ¿qué sucede con la tensión Thevenin? ¿Y con la resistencia Thevenin?

Sección 1-6. Teorema de Norton

- 1-16. Un circuito tiene una tensión Thevenin de 15 V y una resistencia Thevenin de 3 k Ω . ¿Cuál es el circuito Norton correspondiente?
- 1-17. Un circuito tiene una corriente Norton de 10 mA y una resistencia Norton de 10 k Ω . ¿Cuál es el circuito equivalente Thevenin?
- 1-18. ¿Cuál es el circuito equivalente Norton para la Figura 1-19?

Sección 1-7. Detección de averías

- 1-19. Suponiendo que en la Figura 1-19 la tensión en la carga es de 36 V, ¿qué error hay en R_1 ?
- 1-20. La tensión en la carga del circuito de la Figura 1-19 vale cero. Si la batería y la resistencia de carga son correctas, sugiera dos averías posibles.
- 1-21. Si la tensión en la carga del circuito de la Figura 1-19 es cero y todas las resistencias son correctas, ¿dónde se localiza la avería?
- 1-22. Si la tensión en la carga del circuito de la Figura 1-19 es de 12 V, ¿cuál es la avería probable?

PROBLEMAS DE MAYOR DIFICULTAD

- 1-23. Una fuente de tensión se cortocircuita temporalmente. Si la tensión ideal es de 6 V y la corriente por la carga en corto es de 150 A, ¿cuál es la resistencia interna de la fuente?
- 1-24. En el circuito de la Figura 1-17 la tensión ideal es de 10 V y la resistencia de carga es de 75 Ω . Siendo la tensión en la carga de 9 V, ¿cuánto vale la resistencia interna?, ¿es constante la fuente de tensión?
- 1-25. En una caja negra con una resistencia de 2 k Ω conectada entre sus terminales de carga, ¿cómo se podría medir la tensión Thevenin?
- 1-26. La caja negra del problema anterior presenta un mando que le permite reducir todas las fuentes internas de corriente y de tensión a cero. ¿Cómo se podría medir la resistencia Thevenin?
- 1-27. Resuelva el Problema 1-13. Luego resuélvalo sin emplear el teorema de Thevenin. Al terminar, escriba un comentario acerca de lo que aprendió sobre el teorema de Thevenin.
- 1-28. Usted está en el laboratorio viendo un circuito como el de la Figura 1-20. Alguien le reta a encontrar el circuito equivalente de Thevenin. Describa un procedimiento experimental para medir la tensión de Thevenin y la resistencia Thevenin.
- 1-29. Diseñe un hipotético generador de corriente, empleando una batería y una resistencia, que proporcione una corriente fija de 1 mA a cualquier resistencia de carga entre 0 y 10 k Ω .
- 1-30. Diseñe un divisor de tensión (similar al de la Figura 1-19) que reúna lo siguiente: la tensión ideal es de 30 V, la tensión con la carga en circuito abierto es de 15 V y la resistencia Thevenin es igual o menor de 2 k Ω .
- 1-31. Diseñe un divisor de tensión como el de la Figura 1-19 que genere una tensión fija de 10 V para todas las resistencias de carga mayores que 1 M Ω . Emplee una tensión ideal de 30 V.
- 1-32. Sólo con una pila tipo D-cell para linterna y un polímetro (voltímetro-ohmetro-miliamperímetro «VOM»), describa un método experimental para hallar el circuito equivalente Thevenin de la pila.
- 1-33. Sólo con una pila D-cell, un VOM y una caja con varias resistencias, describa un método mediante el cual, empleando una resistencia, halle la resistencia Thevenin de la pila.
- 1-34. Calcule la corriente por la carga en la Figura 1-21 para cada una de las resistencias siguientes: 0,1 k Ω , 2 k Ω , 3 k Ω , 4 k Ω , 5 Ω y 6 k Ω .

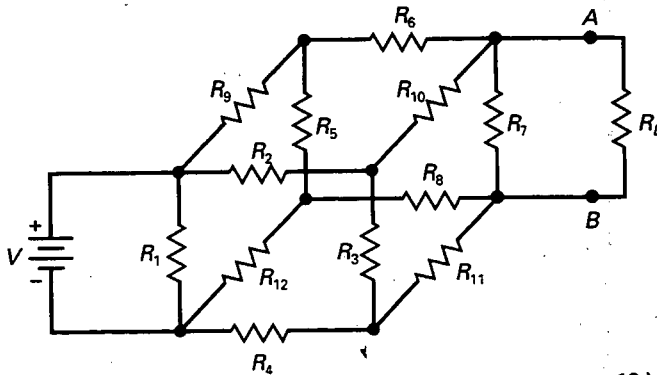


Figura 1-20

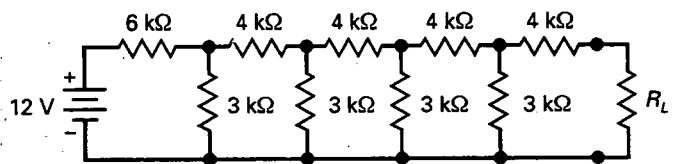
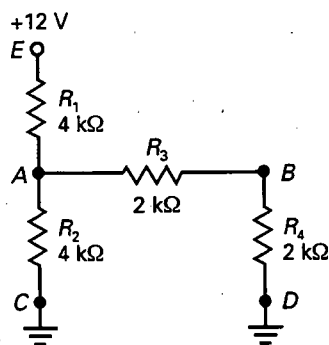


Figura 1-21

DETECTOR DE AVERÍAS

1-35. Use el detector de averías de la Figura 1-22 para los siguientes problemas. Los problemas

son una de las resistencias abierta, una de las resistencias cortocircuitada, una masa abierta o falta de tensión de alimentación. ¿Qué está causando los Problemas 1 al 11?



	1	2	3	4	5	6
A	4	0	12	6	4	3
B	6	12	0	3	4	0
C	12	3	6	12	3	0
D	6	0	6	0	12	0
E	0	2	4	12	0	6
F	12	0	6	4	6	12

TENSIONES

Sin
problemas

$V_A: B5$
 $V_B: E2$
 $V_E: C4$

Avería 1

$V_A: C1$
 $V_B: F3$
 $V_E: D5$

Avería 2

$V_A: B3$
 $V_B: C6$
 $V_E: A3$

Avería 3

$V_A: E1$
 $V_B: B6$
 $V_E: B2$

Avería 4

$V_A: B1$
 $V_B: D4$
 $V_E: E4$

Avería 5

$V_A: C2$
 $V_B: A6$
 $V_E: F1$

Avería 6

$V_A: D3$
 $V_B: C5$
 $V_E: A3$

Avería 7

$V_A: A4$
 $V_B: E6$
 $V_E: C4$

Avería 8

$V_A: D1$
 $V_B: C5$
 $V_E: F1$

Avería 9

$V_A: F2$
 $V_B: A2$
 $V_E: D2$

Avería 10

$V_A: B4$
 $V_B: D6$
 $V_E: D5$

Avería 11

$V_A: F5$
 $V_B: C3$
 $V_E: F6$

Figura 1-22. Detector de averías: una simulación de detección de averías.