



Universidad Nacional
de Mar del Plata

*Departamento de Ingeniería
Eléctrica*

Área Electrotecnia



Electrotecnia

(para la Carrera Ingeniería Mecánica)

Conceptos Básicos

Profesor Adjunto: Ingeniero Electricista y Laboral Gustavo L. Ferro
mail: gferro@fi.mdp.edu.ar
EDICION 2016

INDICE

Capítulo 1

CONCEPTOS BÁSICOS

1. **Introducción al estudio de los circuitos eléctricos**
2. **Teoría de circuitos**
3. **Definiciones y unidades**
4. **Carga y corriente**
5. **Tensión (voltaje)**
6. **Energía y potencia**
7. **Elementos activos y pasivos**
8. **Análisis de circuitos**

➤ **BIBLIOGRAFIA RECOMENTADA:**

- ✓ **Fundamentos de Circuitos Eléctricos**
- ✓ **Autor: Charles K. Alexander – Mattheu N. O. Sadiku**
- ✓ **Capítulo 1**

1. Introducción al estudio de los circuitos eléctricos

Podemos definir la Electrotecnia como el estudio de las aplicaciones técnicas de la electricidad.

La electrotecnia como profesión se preocupa fundamentalmente de la conversión de energía desde alguna de sus formas a una forma más conveniente: **la energía eléctrica, de la transmisión y control de la energía en esta forma y finalmente de su reconversión en otras formas de uso.**

Es decir podemos decir que es la parte de la técnica que se ocupa de la producción (generación), transmisión, distribución y utilización de la electricidad.

La electrotecnia se divide hoy en dos grandes ramas:

- ✓ **Técnica de la electrónica**
- ✓ **Técnica de la energía eléctrica**

Esta segunda es la que desarrollaremos en esta materia, aunque no es posible una división neta ya que ambas ramas de la tecnología tienen muchos puntos en común, pero si deseamos hacer una distinción podemos decir que:

- **ELECTRONICA es la técnica de las altas frecuencia y las bajas potencias**
- **ENERGIA ELECTRICA es la técnica de las bajas frecuencias y altas potencias**

En sus aspectos tecnológicos, los sistemas que se tratan en la electrotecnia se dividen en dos partes principales:

- ❖ **La primera parte incluye elementos tangibles - generadores, motores, transformadores, dispositivos electrónicos, aparatos eléctricos, etc.- ideados para hacer uso de cargas y campos intangibles.**
- ❖ **La segunda parte: abstracciones, teorías, análisis y formulaciones ideadas para expresar estas cargas y estos campos.**

Dentro de esta asignatura trataremos de desarrollar los fundamentos de la teoría de circuitos, en los que se puede considerar con precisión suficiente un sistema eléctrico como combinación de elementos caracterizados por: **resistencias, inductancias y capacidades, así como por tensiones y corrientes, esto es, por fuentes de energía eléctrica.**

La teoría de los circuitos eléctricos y la teoría electromagnética son las dos teorías fundamentales a partir de las cuales se construyen todas las ramas de la ingeniería eléctrica. Muchas ramas de la ingeniería eléctrica, tales como los sistemas de potencia, las máquinas eléctricas, la electrónica, las comunicaciones y la instrumentación están basadas en la teoría de los circuitos eléctricos.

En ingeniería eléctrica, estamos a menudo interesados en transferir energía de un punto a otro. Esto requiere la interconexión de distintos aparatos eléctricos. Dicha interconexión constituye lo que denominamos circuito eléctrico, donde cada componente del circuito es conocido como un elemento.

“Un circuito eléctrico es una interconexión de elementos eléctricos”

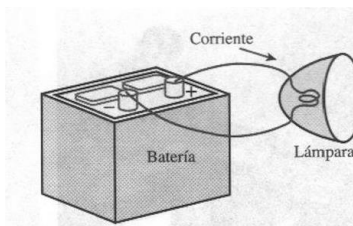
Un circuito eléctrico simple se representa en la figura que sigue. Consta de tres elementos básicos: **una batería, una lámpara y alambres de conexión.** Un circuito simple como éste puede existir por sí mismo; tiene varias aplicaciones, como las de linterna, reflector, etc.

Los circuitos eléctricos se usan en numerosos sistemas eléctricos para realizar diferentes tareas. El objetivo de este apunte no es el estudio de diversos usos y aplicaciones de circuitos. El principal interés es el “análisis de los circuitos”

Por análisis de un circuito se entiende un estudio del comportamiento del circuito: ¿Cómo responde a una entrada determinada? ¿Cómo interactúan los elementos y dispositivos interconectados en el circuito?

Este estudio inicia con la definición de algunos conceptos básicos.

Estos conceptos son **carga, corriente, tensión elementos de circuito, potencia y energía**. Antes de definirlos se debe establecer el sistema de unidades que se usará a lo largo del curso.



2. Teoría de circuitos

La teoría de circuitos es, por consiguiente, un punto de partida conveniente para el estudio de la electrotecnia, porque los **elementos tangibles de tantos sistemas eléctricos** se pueden expresar por medio de estas **cinco componentes fundamentales de los circuitos eléctricos** y porque la teoría de circuitos asimila más fácilmente al principio que la teoría básica del campo de la cual se deriva.

3. Definiciones y unidades

Un circuito eléctrico o red eléctrica, es una colección de elementos eléctricos interconectados de alguna forma específica.

Los resistores, inductores, capacitores, baterías, generadores, etc., son ejemplos familiares de elementos que constituyen los circuitos eléctricos.

Veamos algunas definiciones asociadas con un circuito eléctrico:

- ✓ Se denomina “**brazo o rama**” a una parte del circuito que contiene uno o varios elementos (resistencias, fuentes, capacitores, inductancias, etc.).
- ✓ Se denomina “**nodo**” a un punto de la red donde se unen dos o más brazos.
- ✓ Se denomina “**malla**” es un circuito cerrado dentro de una red.
- ✓ Se denomina “**red**” es un conjunto de mallas y nodos.

Para definir más específicamente un elemento de un circuito necesitaremos considerar ciertas cantidades relacionadas con él, tales como el voltaje y la corriente.

El sistema de unidades que utilizaremos a lo largo del dictado de la materia es el Sistema Internacional de Unidades (SI). Hay seis unidades básicas en el SI y cuatro son las que nos interesan en circuitos: el metro, el kilogramo, el segundo y el Coulomb.

La cuarta unidad en el SI es el coulomb (C), es la unidad básica usada para medir carga eléctrica.

Hay cuatro unidades derivadas: el Ampere es la unidad de corriente eléctrica, el Newton para medir la fuerza, el Joule es la unidad fundamental del trabajo o energía, el Watt es la unidad fundamental de potencia.

En la tabla 1.1 se detallan las seis unidades básicas del sistema internacional (SI)

TABLA 1.1 Las seis unidades básicas del SI.

Cantidad	Unidad básica	Símbolo
Longitud	metro	m
Masa	kilogramo	kg
Tiempo	segundo	s
Corriente eléctrica	ampere	A
Temperatura termodinámica	kelvin	K
Intensidad luminosa	candela	cd

4. Carga y corriente

El concepto de carga eléctrica es el principio fundamental para explicar todos los fenómenos eléctricos. La cantidad básica en un circuito eléctrico es la carga eléctrica.

“Carga es una propiedad eléctrica de las partículas atómicas de las que se compone la materia, medida en coulomb [C]”

Gracias a la física elemental se sabe que toda la materia se compone de bloques constitutivos fundamentales conocidos como átomos y que cada átomo consta de electrones, protones y neutrones. También se sabe que la carga “e” de un electrón es negativa e igual en magnitud a $1,602 \times 10^{-19}$, en tanto que un protón lleva una carga positiva de la misma magnitud que la del electrón. Cabe señalar los siguientes puntos sobre la carga eléctrica:

1. El coulomb es una unidad grande para cargas. En 1 C de carga, hay $1 / 1,602 \times 10^{-19} = 6,24 \times 10^{18}$ electrones. Así, valores realistas o de laboratorio de cargas son del orden de pC, nC y μ C.
2. De acuerdo con observaciones experimentales, las únicas cargas que ocurren en la naturaleza son múltiplos enteros de la carga electrónica $e = - 1,602 \times 10^{-19}$ C.
3. La ley de la conservación de la carga establece que la carga no puede ser creada ni destruida, sólo transferida. Así, la suma algebraica de las cargas eléctricas en un sistema no cambia.

Matemáticamente, la relación entre la corriente “i”, la carga “q” y el tiempo “t” es la siguiente:

$$i \triangleq \frac{dq}{dt}$$

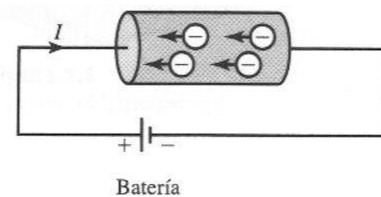


Figura 1.3 Corriente eléctrica debida al flujo de una carga electrónica en un conductor.

Donde la corriente se mide en Amperes [A] y 1 Ampere = 1 coulomb /segundo.

La carga transferida entre el tiempo t_0 y t se obtiene integrando ambos miembros de la ecuación 1.1.

$$Q \triangleq \int_{t_0}^t i dt$$

La forma en que se define la corriente como “i” indica que no necesario que la corriente sea una función de valor constante.

Una corriente directa (cd) es una corriente que permanece constante en el tiempo.

Una corriente alterna (ca) es una corriente que varía senoidalmente con el tiempo.

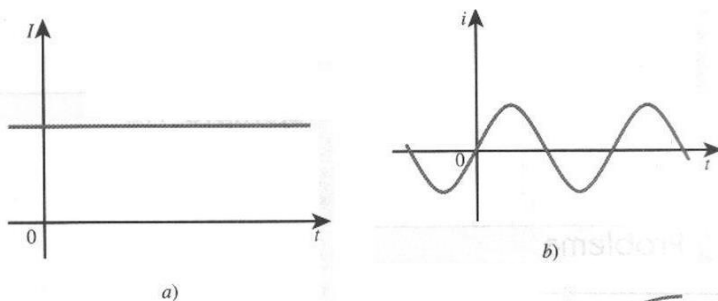
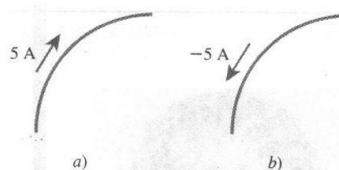


Figura 1.4 Dos tipos comunes de corriente: a) corriente directa (cd); b) corriente alterna (ca).

Figura 1.5 Flujo de corriente convencional: a) flujo de corriente positiva, b) flujo de corriente negativa.



Esta corriente se emplea en los hogares, comercios e industrias. Una vez definida la corriente como el movimiento de carga, es de esperar que la corriente tenga una dirección asociada al flujo. Por convención se considera que la dirección del flujo de la corriente es la dirección del movimiento de carga positiva.

Como base en esta convención, una corriente de 5 A puede representarse positiva o negativamente, como se observa en la figura.

Ejemplo 1.1. ¿Cuánta carga representan 4600 electrones?

Solución: cada electrón tiene $-1,602 \times 10^{-19}$ C. Así 4600 electrones tendrán:

$$-1,602 \times 10^{-19} \text{ C/electrón} \times 4600 \text{ electrones} = -7.369 \times 10^{-16} \text{ C}$$

Ejemplo 1.2. La carga total que entra a una terminal está determinada por $q = 5 t \text{ sen } 4\pi t$. Calcule la corriente en $t = 0,5$ s.

Solución:

$$i = dq/dt = (5 t \text{ sen } 4\pi t + 20\pi t \text{ cos } 4\pi t) \text{ mA. En } t = 0,5 \text{ s resulta: } i = 31.42 \text{ mA}$$

Ejemplo 1.3

Determine la carga total que entra a una terminal entre $t = 1$ s y $t = 2$ s si la corriente que pasa por la terminal es $i = (3t^2 - t)$ A.

Solución:

$$Q = \int_{t=1}^2 i dt = \int_1^2 (3t^2 - t) dt$$

$$= \left(t^3 - \frac{t^2}{2} \right) \Big|_1^2 = (8 - 2) - \left(1 - \frac{1}{2} \right) = 5.5 \text{ C}$$

5. Tensión (voltaje o diferencia de potencial)

Como se explicó en la sección anterior, para mover el electrón en un conductor en una dirección particular es necesario que se transfiera cierto trabajo o energía.

Este trabajo lo lleva a cabo una fuerza electromotriz externa (f.e.m.), habitualmente representada por una batería.

Esta f.e.m. también se conoce como “tensión o diferencia de potencial”. La tensión v_{ab} entre dos puntos a y b en un circuito eléctrico es la energía (o trabajo) necesario para mover una carga unitaria desde a hasta b, matemáticamente:

$$v_{ab} \triangleq \frac{dw}{dq}$$

Donde w es la energía en joules (J) y q es la carga en coulombs (C). La tensión v_{ab} o simplemente v , se mide en volts (V). Se cumple que:

$$1 \text{ volt} = 1 \text{ joule} / \text{coulomb} = 1 \text{ newton} - \text{metro} / \text{coulomb}$$

Tensión (o diferencia de potencial) es la energía requerida para mover una carga unitaria a través de un elemento, medida en volts [V]

En la figura aparece la tensión entre los extremos de un elemento (representado por un bloque rectangular) conectado a los puntos a y b. Los signos más (+) y menos (-) se usan para definir la dirección o polaridad de la tensión de referencia.

El voltaje v_{ab} puede interpretarse de dos maneras:

- 1) El punto a está a un potencial mayor que el punto b, o
- 2) El potencial del punto a respecto del punto b es v_{ab} .

De esto se desprende que se cumple: $v_{ab} = -v_{ba}$

Por ejemplo, en la figura 1.7. tenemos dos representaciones de la misma tensión. En la figura 1.7 a), el punto a tiene + 9 V más que el punto b; en la figura 1.7 b), el punto b tiene - 9 V más que el punto a).

Corriente y tensión son las dos variables básicas en circuitos eléctricos. El término común señal se aplica a una cantidad eléctrica como una corriente o tensión que se usa para transmitir información.

Al igual que en el caso de la corriente eléctrica, a una tensión constante se le llama tensión de cd y se le representa como V , mientras que a una tensión que varía senoidalmente con el tiempo se le llama tensión de ca y se le representa como v .

Una tensión de cd la produce comúnmente una batería, una tensión de ca la produce un generador eléctrico.

6. Potencia y energía

Aunque corriente y tensión son las dos variables básicas en un circuito eléctrico, no son suficientes por sí mismas. Para efectos prácticos, se necesita saber cuanta **potencia puede manejar un dispositivo eléctrico**.

Para relacionar potencia y energía con tensión y corriente, recuérdese de física:

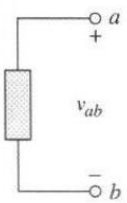


Figura 1.6
Polaridad de tensión v_{ab} .

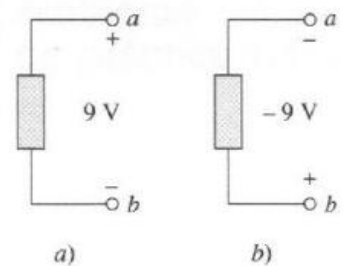


Figura 1.7
Dos representaciones equivalentes de misma tensión v_{ab} : a) el punto a tiene más que el punto b, b) el punto b tiene V más que el punto a.

“Potencia es la variación respecto al tiempo de la energía, medida en watts (W)”

Esta relación se escribe como:

$$p \triangleq \frac{dw}{dt}$$

Donde p es la potencia, en watts (W), w es la energía, en joules (J) y t es el tiempo en segundos (s).

De las ecuaciones anteriores se desprende que:

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = vi$$

$$p = vi$$

La potencia “ p ” de la ecuación anterior es una cantidad que varía con el tiempo y se llama “potencia instantánea”

Así, la potencia absorbida o suministrada por un elemento es el producto de la tensión y la corriente a través de él.

Si la potencia tiene signo (+), se está suministrando o la está absorbiendo el elemento.

Si, por el contrario, tiene signo (-), está siendo suministrada por el elemento.
Pero, **¿Cómo saber cuando la potencia tiene signo negativo o positivo?**

La dirección de la corriente y la polaridad de la tensión desempeñan un papel promordial en la determinación del signo de la potencia.

Por lo tanto, es importante que se preste atención a la relación entre la corriente i y la tensión v en la figura 1.8. a)

La polaridad de tensión y dirección de corriente deben ajustarse a las que aparecen en la figura 1.8 a) para que la potencia tenga signo positivo.

Esto se conoce como convención pasiva de signos. Por efecto de la convención pasiva de los signos, la corriente entra por la polaridad positiva de la tensión. En este caso, $p = +vi$ o $v \cdot i > 0$ implica que el elemento está absorbiendo potencia.

En cambio, si $p = -vi < 0$ el elemento está suministrando energía, como en la fig.1.8 b)

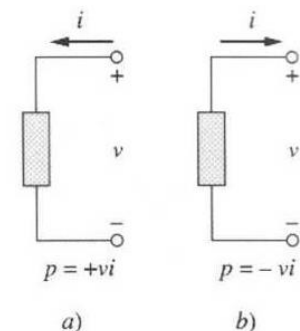


Figura 1.8
Polaridades de referencia para la potencia con el uso de la convención pasiva del signo: a) absorción de potencia, b) suministro de potencia.

“La convención pasiva de signos se satisface cuando la corriente entra por la terminal positiva de un elemento y $p = +vi$. Si la corriente entra por la terminal negativa, $p = -vi$ ”

A partir de la ecuación de la potencia, la energía absorbida o suministrada por un elemento del tiempo t_0 al tiempo t es:

$$w = \int_{t_0}^t p dt = \int_{t_0}^t vi dt$$

Energía es la capacidad para realizar trabajo, medida en joules [J]

Las compañías abastecedoras de energía eléctrica miden la misma en watts – horas (W – h) donde $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$

Ejemplo 1.4

Una fuente de energía fuerza una corriente constante de 2 A durante 10 s para que fluya por una bombilla eléctrica. Si 2.3 kJ se emiten en forma de luz y energía térmica, calcule la caída de tensión en la bombilla.

Solución:

La carga total es

$$\Delta q = i \Delta t = 2 \times 10 = 20 \text{ C}$$

La caída de tensión es

$$v = \frac{\Delta w}{\Delta q} = \frac{2.3 \times 10^3}{20} = 115 \text{ V}$$

Ejemplo 1.5.

¿Cuánta energía consume una bombilla eléctrica de 100 W en dos horas?

Solución:

$$\begin{aligned} w &= pt = 100 \text{ (W)} \times 2 \text{ (h)} \times 60 \text{ (min/h)} \times 60 \text{ (s/min)} \\ &= 720\,000 \text{ J} = 720 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Esto es lo mismo que

$$w = pt = 100 \text{ W} \times 2 \text{ h} = 200 \text{ Wh}$$

Ejemplo 1.6

Halle la potencia que se entrega a un elemento en $t = 3 \text{ ms}$ si la corriente que entra a su terminal positiva es

$$i = 5 \cos 60 \pi t \text{ A}$$

y la tensión es: a) $v = 3i$, b) $v = 3 di/dt$.

Solución:

a) La tensión es $v = 3i = 15 \cos 60 \pi t$; así, la potencia es

$$p = v_i = 75 \cos^2 60 \pi t \text{ W}$$

En $t = 3 \text{ ms}$,

$$p = 75 \cos^2 (60 \pi \times 3 \times 10^{-3}) = 75 \cos^2 0.18 \pi = 53.48 \text{ W}$$

b) Se encuentra la tensión y la potencia como

$$v = 3 \frac{di}{dt} = 3(-60\pi)5 \text{ sen } 60\pi t = -900\pi \text{ sen } 60\pi t \text{ V}$$

$$p = vi = -4\,500\pi \text{ sen } 60\pi t \cos 60\pi t \text{ W}$$

En $t = 3 \text{ ms}$,

$$\begin{aligned} p &= -4\,500\pi \text{ sen } 0.18\pi \cos 0.18\pi \text{ W} \\ &= -14\,137.167 \text{ sen } 32.4^\circ \cos 32.4^\circ = -6.396 \text{ kW} \end{aligned}$$

7. Elementos de circuitos

Como se explicó en el punto anterior, un elemento es el bloque constitutivo básico de un circuito. Un circuito eléctrico es simplemente una interconexión de elementos. El análisis de circuitos es el proceso de determinar las tensiones (o las corrientes) a través de los elementos de circuito.

Hay dos tipos de elementos en los circuitos eléctricos: elementos pasivos y elementos activos. Un elemento activo es capaz de generar energía, mientras que un elemento pasivo no.

Ejemplos de elementos pasivos son los resistores, los capacitores y los inductores.

Los elementos activos más comunes incluyen a los generadores y las baterías.

Los elementos activos más importantes son las fuentes de tensión o de corriente, que generalmente suministran potencia al circuito conectado a ellas. Hay dos tipos de fuentes: independientes y dependientes.

Una fuente INDEPENDIENTE IDEAL es un elemento activo que suministra una tensión o corriente especificada y que es totalmente independiente de los demás elementos del circuito

Una fuente independiente ideal de tensión suministra al circuito la corriente necesaria para mantener la tensión entre las terminales. En la figuras 1.11 y 1.12 pueden verse los símbolos para representar las fuentes de tensión y corriente.

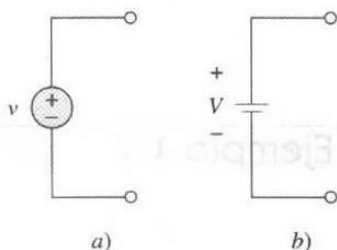


Figura 1.11
Símbolos para fuentes de tensión independientes: a) usado para tensión constante o que varía con el tiempo, b) usado para tensión constante (cd).



Figura 1.12
Símbolo para fuente de corriente independiente.

Una fuente dependiente ideal (o controlada) es un elemento activo en el que la magnitud de la fuente se controla por medio de otra tensión o corriente

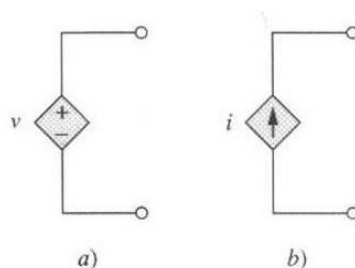


Figura 1.13
Símbolos de: a) fuente de tensión dependiente, b) fuente de corriente dependiente.

Las fuentes dependientes son útiles en el modelado de elementos como transistores, amplificadores operaciones y circuitos integrados. Un ejemplo de una fuente de tensión controlada por corriente se muestra en la parte derecha de la figura, donde la tensión $10i$ de la fuente depende de la corriente i a través del elemento C.

A los estudiantes podría sorprenderles que el valor de la fuente de tensión dependiente sea de $10i$ [V], puesto que es una fuente de tensión. La idea clave para tener en cuenta es que una fuente de tensión contiene polaridades (+ -) en su símbolo, mientras que una fuente de corriente se presenta con una flecha, sin importar de qué dependa.

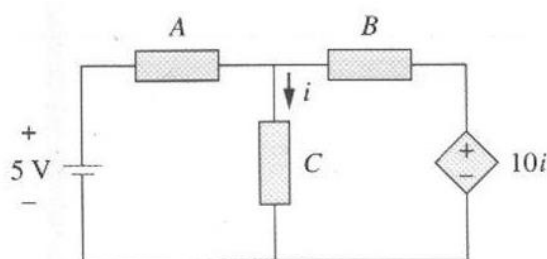


Figura 1.14
La fuente de la parte derecha es una fuente de tensión controlada por corriente.

Ejemplo 1.7

Calcule la potencia suministrada o absorbida por cada elemento de la figura 1.15.

Solución:

Se aplica la convención de los signos para la potencia que se mostró en las figuras 1.8 y 1.9. En el caso de p_1 , la corriente de 5 A sale de la terminal positiva (o entra a la terminal negativa); así,

$$p_1 = 20(-5) = -100 \text{ W} \quad \text{Potencia suministrada}$$

En p_2 y p_3 , los flujos de corriente entran a la terminal positiva del elemento en cada caso.

$$p_2 = 12(5) = 60 \text{ W} \quad \text{Potencia absorbida}$$

$$p_3 = 8(6) = 48 \text{ W} \quad \text{Potencia absorbida}$$

Para p_4 , se debe hacer hincapié en que la tensión es de 8 V (positivo en el extremo superior), igual que la tensión para p_3 , pues tanto el elemento pasivo como la fuente dependiente están conectados a las mismas terminales. (Recuérdese que la tensión siempre se mide a través de un elemento en un circuito.) Dado que la corriente sale de la terminal positiva,

$$p_4 = 8(-0.2I) = 8(-0.2 \times 5) = -8 \text{ W} \quad \text{Potencia suministrada}$$

Obsérvese que la fuente de tensión independiente de 20 V y la fuente de corriente dependiente de $0.2I$ están suministrando potencia al resto de la red, mientras que los dos elementos pasivos la están absorbiendo. Asimismo,

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = -100 + 60 + 48 - 8 = 0$$

De acuerdo con la ecuación (1.8), la potencia total suministrada equivale a la potencia total absorbida.

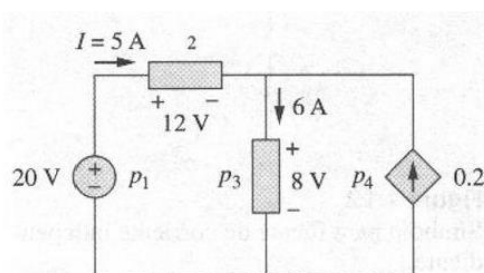


Figura 1.15
Para el ejemplo 1.7.

7.2. Fuentes de tensión y corriente reales. Transformación de fuentes

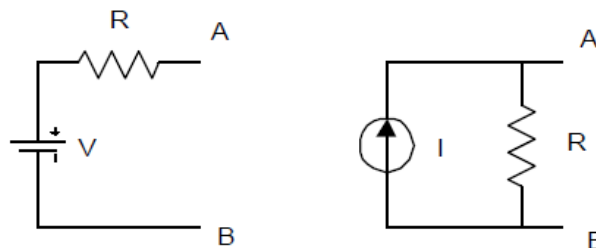
Existen dos modelos de fuentes de tensión o corriente, las ideales y las reales. Las ideales son aquellas en que se utiliza el valor de la tensión o corriente como único elemento para referirse a ellas.

En el caso de las fuentes reales llevan asociadas una resistencia en serie o paralelo a la fuente, según se trate de una fuente de tensión o de corriente respectivamente.

Es posible transformar fuentes reales de tensión en fuentes reales de corriente y viceversa.

El procedimiento consiste en:

- Aplicar la ley de Ohm para determinar el valor del parámetro deseado, utilizando la resistencia interna de la fuente.
- Conectar la misma resistencia que tenemos en serie o paralelo según se trate de una fuente de tensión o corriente.



$$V = I \cdot R$$

En caso de tratar circuitos excitados con corrientes alternas senoidales la resistencia R, debe ser reemplazada por la resistencia en ca que se denomina impedancia Z y que desarrollaremos al tratar los circuitos excitados con ese tipo de fuente.

8. Análisis de circuitos

Se espera que si un circuito eléctrico está sujeto a una entrada o excitación en la forma de un voltaje o una corriente proporcionados por una fuente independiente, se producirá una salida o respuesta. La salida o respuesta pueden ser también un voltaje o una corriente asociados con algún elemento del circuito.

Hay dos grandes ramas de la teoría de los circuitos derivados de las tres palabras clave siguientes: **entrada, salida y circuito**.

La primera rama es el análisis de circuitos en el cual dados la entrada y el circuito se trata de determinar la salida.

La otra rama es la síntesis de los circuitos, en la cual, dadas la entrada y la salida, se trata de conocer el propio circuito.

Nosotros nos dedicaremos a la primera rama, desarrollando métodos sistemáticos de análisis que puedan aplicarse en lo general a cualquier circuito del tipo que se considere.

Glf/2015