

FUNDAMENTOS DE LA ELECTRICIDAD



ESTE capítulo introductorio trata de los principios y definiciones del paso de un flujo eléctrico a través de un circuito. En capítulos posteriores aplicaremos estos conocimientos fundamentales al análisis de un circuito de protección catódica para determinar los indicadores de la eficiencia de un proceso, como el voltaje de celda, las caídas óhmicas en diversas partes del circuito, la distribución de corriente, etcétera.

Para describir un circuito eléctrico simple estudiaremos un sistema de protección catódica el cual puede consistir simplemente en una fuente de poder conectada a uno o más componentes, principalmente resistores (serán descritos más adelante), por medio de un alambre hecho de un material conductor (cobre, por ejemplo), el circuito eléctrico simple constituye una fuente de poder que va a proporcionar una fuerza electromotriz estableciendo diferencias de potencial a través de los varios componentes del circuito e impulsando la corriente a través de ellos. Todos estos componentes ofrecerán varios grados de resistencia al flujo de la corriente.

En cualquier circuito eléctrico, entonces, existen varios fenómenos que tenemos que medir:

- 1) La corriente, medida en amperes (**A**);
- 2) La fuerza electromotriz y la diferencia de potencial, ambas medidas en voltios (**V**);
- 3) La resistencia, medida en ohms (Ω).

CONDUCTORES

La naturaleza y los tipos de materiales que participan en las reacciones electroquímicas de un sistema de protección catódica pueden tener un gran efecto sobre los resultados que se obtengan.

Es, por lo tanto, necesario familiarizarse con los factores que influyen en la conducción de corriente.

La conductividad eléctrica es el movimiento de la carga eléctrica. La habilidad de diferentes sustancias para permitir el flujo de una carga está determinada por la movilidad de los electrones portadores de la carga o de los iones que contenga la sustancia.

Conductores de primer orden

Los conductores de primer orden son aquellos que poseen conductancia eléctrica, en los cuales los portadores de la carga son los electrones. Se caracterizan por tener una conducción sin transferencia substancial de masa. La mayoría de los metales, el grafito y algunos óxidos muestran este tipo de conducción. A veces, a estos materiales se les conoce como conductores metálicos y su conductividad decrece cuando aumenta la temperatura.

Conductores de segundo orden

Los conductores de segundo orden poseen conductancia iónica o electrolítica, y los portadores de la carga son los iones. En este tipo de conductores se da una transferencia de masa asociada con la conductividad. Las soluciones acuosas con sales disueltas, los suelos y las sales iónicas son algunos ejemplos de este tipo de conductores. Su conductividad aumenta cuando se incrementa la temperatura.

Conductores mixtos o de tercer orden

Algunos materiales, llamados comúnmente semiconductores, poseen tanto conductancia iónica como eléctrica. Por lo general predomina el carácter eléctrico. Su conductividad es demasiado baja en general, pero aumenta rápidamente con la temperatura. La mayoría de los óxidos metálicos (**NiO, ZnO, etc.**) y algunos metales (Si, Ge, etc.) se agrupan dentro de esta categoría.

AISLANTES

Otras clases de materiales que merecen ser mencionados son los aislantes. La conductancia en ellos es muy difícil, sin importar el tipo de mecanismo que participe en la conductividad, sobre todo si se les compara con la de los conductores mencionados antes.

La influencia del proceso de conducción en la conducta electroquímica de las reacciones es muy importante. Cada reacción de corrosión, así como las presentes en sistemas de protección catódica, tienen un origen electroquímico y se presentan en la interfase entre un conductor de primer orden (eléctrico) y uno de segundo orden (electrolítico). Por ejemplo, si un metal (conductor) tiene una película de óxido o una capa de pintura (aislantes) sobre su superficie, se estaría esperando con esto que tuviera una alta resistencia en la transferencia de electrones. Esto cambiaría la velocidad de la reacción y la energía requerida para llevarla a cabo.

CARGA Y CORRIENTE

Ya que un electrón es una unidad de carga muy pequeña, para medirlo se utiliza una unidad más grande denominada coulomb. Un coulomb corresponde a 6.24 trillones de electrones (**6.24×10^{12}**). A la velocidad de flujo de la carga eléctrica se le conoce como corriente eléctrica (intensidad [**I**]). En fenómenos eléctricos la carga es análoga al volumen de líquido (litros) que fluye por una tubería y la corriente es equiparable a la velocidad de flujo (cantidad de litros por minuto) en dicha tubería.

El flujo de la carga puede trasladarse por medio de electrones (corriente eléctrica) o por iones (corriente iónica). El flujo de corriente en metales se da a través de un flujo de electrones. Un electrolito es aquella sustancia que conduce corriente por flujo iónico.

La unidad básica de la corriente eléctrica (**I**) es el ampere (**A**). Un ampere se define como la velocidad de flujo de una carga (**Q**) de un coulomb, por segundo. Así se expresa esta unidad para el consumo de algunos equipos eléctricos grandes o de celdas electrolíticas industriales a diferencia de los circuitos electrónicos transistorizados o las técnicas electroquímicas, en los cuales se emplean comúnmente dos submúltiplos de esta unidad que son el miliampere (**μA : $0.001 A$**) y el microampere (**μA : $0.000001 A$**).

Resumiendo, podemos decir que:

$$1 \text{ ampere} = 1 \text{ coulomb/segundo} \\ \mathbf{A = Q/seg.}$$

De lo anterior se deduce que la cantidad total de electricidad (**Q**), en coulombs, que pasa por cualquier punto de un circuito eléctrico es el producto de la corriente (**I**), en amperes, y el tiempo (**t**) en segundos:

$$\text{coulombs} = \text{amperes} \times \text{segundos}$$

$$\mathbf{Q = It.}$$

UNIDAD DE DIFERENCIA DE POTENCIAL. EL VOLT

Cuando una corriente eléctrica fluye a través de un alambre conductor, se dice que lo hace porque existe una diferencia de potencial entre los dos extremos del alambre. La diferencia de potencial entre dos puntos se define como el trabajo efectuado (que se mide en joules), cuando un coulomb de electricidad se mueve de un punto al otro. A la unidad con que se mide la diferencia de potencial se le llama volt y se define como sigue: dos puntos tienen una diferencia de potencial de 1 volt cuando se realiza un trabajo de 1 joule por cada coulomb de electricidad que transita de un punto al otro; por lo tanto

$$\mathbf{volt = joule/coulomb}$$

por lo tanto,

$$V = J/Q$$

FUERZA ELECTROMOTRIZ


La fuerza electromotriz (fem) de una celda se mide en volts y se define como la suma de las diferencias de potencial que puede producir a través de todos los componentes de un circuito al cual está conectado, incluyendo la diferencia de potencial requerida para impulsar la corriente a través de la misma celda.

La fem de una celda en volts se define entonces como el trabajo total efectuado en joules por los coulombs de electricidad transportados en un circuito en el que la celda está conectada.

RESISTENCIA

Se ha dicho que los diferentes materiales pueden ser clasificados como conductores buenos o malos y como aislantes. En lo que se refiere a la corriente eléctrica, por lo general se piensa en términos de la habilidad de una sustancia para oponerse al flujo de corriente que pasa por ella. Un buen conductor, se dice, tiene una resistencia pequeña y un mal conductor, una resistencia alta.

Se verá más adelante que la resistencia de un material depende de sus dimensiones y de la sustancia con que está hecho. Para un cable de dimensiones dadas, la plata ofrece la menor resistencia al paso de la corriente, pero como este metal es demasiado caro para un uso común, se usa el cobre para el cableado y la conexión de alambres en los circuitos eléctricos.

Cuando se requiere de una alta resistencia, se emplean casi siempre ciertas aleaciones especiales, para reducir la corriente en un circuito, como el constantan, el manganin y el nicromel.¹ 

El constantan se emplea para uso general, mientras que el manganin se emplea más bien para manufacturar resistores estandarizados de alta calidad, ya que estas aleaciones presentan pequeños cambios en la resistencia debidos a la temperatura.

LEY DE OHM

En 1826 el profesor de física Simon Ohm estableció la siguiente ley como resultado de varios experimentos que efectuó para investigar la relación entre la corriente que pasa por un alambre y la diferencia de potencial establecida entre los extremos del mismo: "La corriente que pasa por un alambre a temperatura constante es proporcional a la diferencia de potencial en sus extremos." El conductor que siga esta relación (los conductores eléctricos) obedece a la ley de Ohm:

$$\text{(diferencia de potencial)} = \text{(constante)} \times \text{(corriente)}$$

El valor de la constante en la ecuación anterior (que es alto cuando el valor de la corriente es pequeño y bajo cuando la corriente es grande) puede ser usado como una medida de la resistencia del alambre:

$$\frac{\text{diferencia de potencial}}{\text{corriente}} = \text{resistencia}$$

En otras palabras, la resistencia de un conductor es la proporción de la diferencia de potencial a través de él y la corriente que fluye. A la unidad de resistencia eléctrica se le llama ohm y se define como: "la resistencia de un conductor dado, cuando se aplica una diferencia de potencial de 1 volt en sus extremos y una corriente de 1 ampere fluye por él":

$$\frac{\text{voltios}}{\text{amperes}} = \text{ohms}$$

lo que formalizado de otra manera es:

$$V = IR$$

La resistencia de un metal puro aumenta con la temperatura, pero la resistencia de otros materiales conductores, como el carbón por ejemplo, decrece con la temperatura. En otras sustancias, como los semiconductores (germanio, silicio y selenio), las disoluciones iónicas que contienen las sales y los suelos, la resistencia también disminuye cuando aumenta la temperatura.

RESISTORES EN SERIE

Se dice que un número de resistores, ($R_1, R_2, R_3, R_n, \dots$) están conectados en serie si su conexión es consecutiva extremo con extremo, de tal suerte que la misma corriente (I), en amperes, fluya a través de cada una (Figura 1).

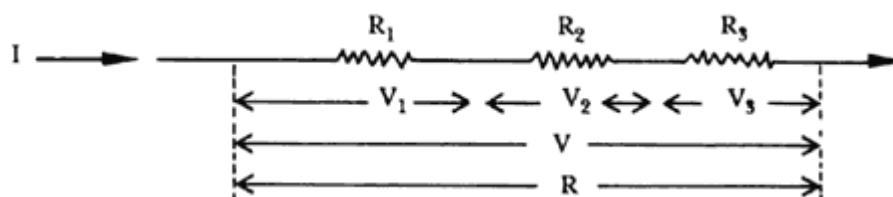


Figura 1. Parte de un circuito eléctrico.

Si R es la resistencia combinada y V , en volts, es la diferencia de potencial total a través de los resistores:

$$V = IR$$

pero como V es igual a la suma de las diferencias de potencial individuales a través de R_1 , R_2 y R_3 :

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$
$$V = IR_1 + IR_2 + IR_3$$

por lo tanto,

$$IR = IR_1 + IR_2 + IR_3,$$

y dividiendo todo entre I , tenemos que:

$$R = R_1 + R_2 + R_3.$$

RESISTORES EN PARALELO

Se dice que los resistores están en paralelo cuando son colocados uno al lado del otro y sus extremos permanecen unidos (Figura 2). La misma diferencia de potencial será entonces aplicada a cada uno, pero compartirán la corriente en el circuito.

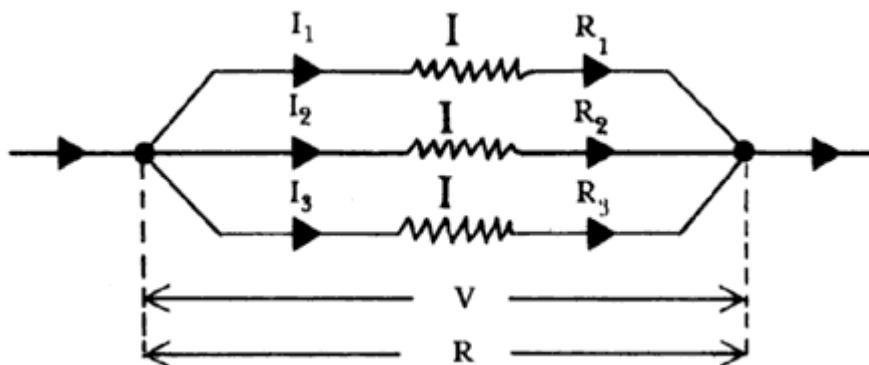


Figura 2. Parte de un circuito eléctrico

Supondremos que la corriente (I) se divide en I_1 , I_2 e I_3 al pasar por R_1 , R_2 y R_3 , respectivamente, y que la diferencia de potencial común es V .

Si R es la resistencia combinada, se puede reescribir:

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

la corriente total es:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

$$I = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3}$$

Por lo tanto,

$$\frac{V}{R} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3}$$

y dividiendo todo entre V, tenemos que:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

IMPORTANCIA PRACTICA DE LA RESISTENCIA INTERNA DE UNA CELDA

Existen diversos tipos de celdas como, por ejemplo, las pilas secas, que pueden obtenerse de tamaños diferentes. Las fuerzas electromotrices de estas celdas serán idénticas en tanto estas últimas sean fabricadas con el mismo material exactamente y con concentraciones de electrolitos iguales. La fuerza de la corriente que se obtiene de una celda no sólo depende de su fuerza electromotriz, sino también de la resistencia interna propia. Con el fin de obtener una corriente grande, la resistencia interna debe de ser baja. En el caso de un acumulador, esto significa que las placas de plomo deben de tener una gran área y deben estar espaciadas a muy corta

distancia. Asimismo, la concentración del electrolito debe ser tal que su resistencia sea la más baja posible.

De acuerdo con su tamaño y construcción, la resistencia interna de una pila seca varía de 0.5 a 1.0 ohm, y la fem es aproximadamente de 1.5 V. Por lo tanto, si las terminales de una pila seca son cortocircuitadas con un pedazo grueso de alambre de cobre cuya resistencia sea despreciable, la máxima corriente que se obtiene sería de 3 a 0.5 A.

La marcha eléctrica de un motor de automóvil necesita de una corriente alta para poder operar. Por esto, las baterías o acumuladores de coches de combustión interna son fabricadas de celdas que contienen muchas placas delgadas con pequeños espaciamientos entre ellas. Ocho pilas secas en serie tendrán la misma fem que la batería de 12 V de un coche, pero serían inoperativas para arrancar la marcha en virtud de su alta resistencia interna.

ARREGLOS DE CELDAS

Se denomina batería a un grupo de celdas conectadas entre sí. Normalmente las celdas se conectan en serie, o sea que el polo positivo de una es conectado al extremo negativo de la próxima celda, etc. (véase la figura 3). En ocasiones, sin embargo, pueden ser conectadas en paralelo, es decir, todos los extremos positivos conectados entre sí, lo mismo que los extremos negativos (Figura 4).

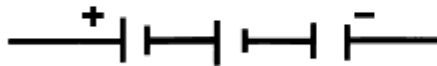


Figura 3. Celdas en serie.

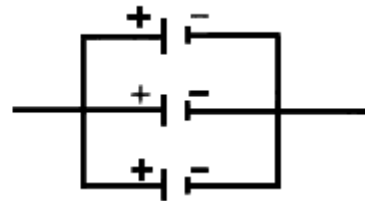


Figura 4. Celdas en paralelo.

Cuando se requiere de la corriente máxima de un número dado de celdas, el arreglo empleado dependerá de la resistencia del circuito externo. Hablando de manera general, se usa una conexión en serie cuando la resistencia del circuito es alta, comparada con la de las celdas, y se emplea una en paralelo cuando la resistencia es baja.

Cuando las celdas están conectadas en serie, la fem total de la batería es igual a la suma de las fems por separado y la resistencia interna es igual a la suma de las resistencias internas de las celdas por separado. Cuando celdas de igual fem y resistencia son conectadas en paralelo, la fem que resulta es la misma que la de una sola celda

y la resistencia interna de la batería se calcularía de acuerdo con la fórmula de los resistores en paralelo.

Una ventaja que se obtiene al conectar celdas en paralelo es que existe un drenaje menor de corriente en las celdas, ya que éstas comparten la corriente total, mientras que en las conexiones en serie la misma corriente principal es proporcionada por cada una de las celdas.

Las celdas nunca se deben dejar conectadas en paralelo cuando no están en uso, ya que si la fem de una es ligeramente mayor que la de la otra, comenzará a circular corriente en la batería misma y las celdas se agotarán rápidamente. Esto no sucede cuando se conectan en serie.

"PÉRDIDA O CAÍDA DE VOLTAJE" CUANDO UNA CELDA PRODUCE CORRIENTE EN UN CIRCUITO

Por razones prácticas, la fem de una celda puede medirse con un valor muy aproximado si tomamos la lectura de un voltímetro de alta resistencia conectado directamente a través de las terminales de la celda cuando ésta no se encuentre conectada a ningún circuito.

Supongamos que un voltímetro conectado a las terminales de una pila seca, con una resistencia interna de 2Ω , da una lectura de 1.5 V : Esta es la fem de la pila (Figura 5 a).

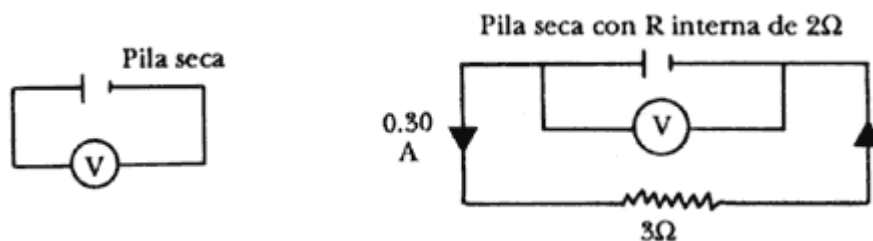


Figura 5. (a) El voltímetro de alta resistencia mide una fem de 1.5 V (se desprecia el flujo de corriente). (b) El voltímetro mide sólo 0.90 V . Una pérdida de voltaje de 0.60 V impulsa la corriente a través de la resistencia interna.

Cuando un resistor de 3Ω se conecta a las terminales de la celda y una corriente fluye a través de él, se observa que la lectura del voltímetro ha caído a 0.90 V (Figura 5 b). La celda parece haber "perdido" 0.6 V ($1.5 - 0.9 = 0.6\text{ V}$). Esto puede explicarse como sigue: la corriente que circula por el circuito está dada por

$$I = \frac{\text{fem}}{\text{resistencia total}} = \frac{E}{R+B}$$

en donde

E = fem

R = resistencia del circuito externo

B = resistencia interna de la celda.

$$\mathbf{I = \frac{1.5}{3 + 2} = 0.30 \text{ A.}}$$

La diferencia de potencial (dp) requerida para impulsar esta corriente a través de la resistencia externa de **3 Ω** es:

$$\begin{aligned}\mathbf{V} &= \mathbf{IR} \\ \mathbf{V} &= \mathbf{0.30 \times 3.0} \\ \mathbf{V} &= \mathbf{0.90 \text{ V,}}\end{aligned}$$

que es el valor de la lectura del voltímetro.

El voltímetro está conectado a las terminales de la celda, pero en cambio si estuviera conectado a través de los extremos de la resistencia de **3Ω**, no habría diferencia alguna en la lectura. Esto se debe al hecho de que los alambres que conectan la celda a la resistencia tienen una resistencia despreciable y por consiguiente su dp también es despreciable; por lo tanto, la dp en las terminales de la celda es igual a la dp en el resistor.

La dp requerida para impulsar la corriente a través de la misma celda está dada por:

Corriente multiplicada por = **0.30 x 2.0 = 0.60 V**, la resistencia interna

valor igual al "voltaje perdido" o sea la "caída de potencial" de la celda.

Se dijo al principio de esta sección que un voltímetro daría un valor muy aproximado de la fem de la celda. Esto se debe a que incluso un voltímetro de muy alta resistencia drena algo de corriente y por esta razón una pequeña parte de la fem de la celda se "perderá" en impulsar dicha corriente a través del equipo de medición. Sin embargo, si la resistencia del voltímetro es muy alta, comparada con la resistencia de la celda, la corriente drenada será muy pequeña y en consecuencia la "caída de potencial" en este caso será numéricamente despreciable.

EJEMPLO ILUSTRATIVO

Un ejemplo ilustrará mejor lo expuesto líneas atrás: Dos estructuras metálicas enterradas, **A** y **B**, se encuentran conectadas eléctricamente en paralelo a una batería de **12 V**, cuya resistencia interna total es de $0.6\ \Omega$, tal y como se representa en la figura 6. Las resistencias del terreno para **A** y **B** son de **4** y **6** Ω , respectivamente, y la resistencia total del cable es de $1\ \Omega$. Se trata entonces de encontrar la corriente que fluye a través del suelo entre A y B. En la figura 6 simplificada, se supone que cualquier otra caída de potencial se ignorará por el momento.

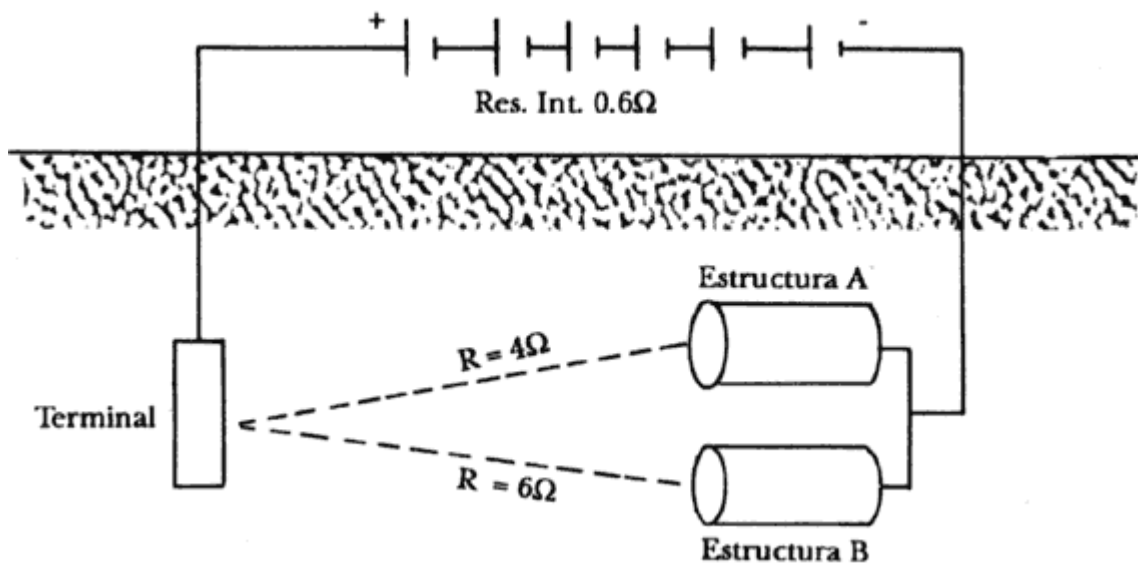
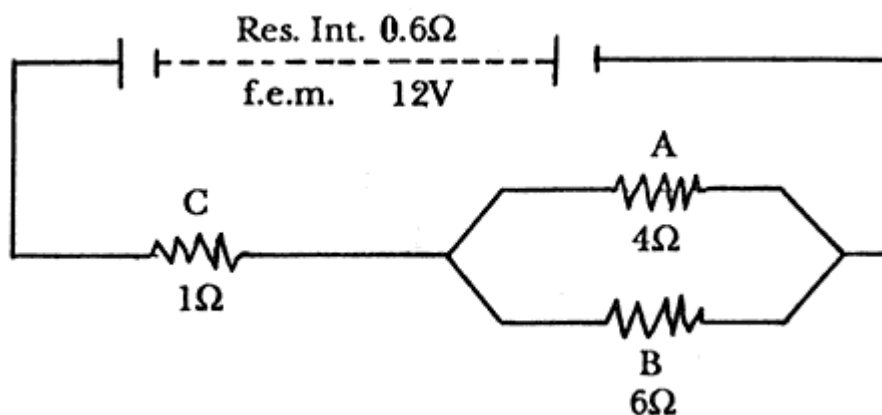


Figura 6. Estructuras metálicas enterradas, conectadas eléctricamente a una batería.

El primer paso para estudiar un problema eléctrico es dibujar un diagrama del circuito:



La resistencia combinada (**R**), en ohms, de **A** y **B** está dada por:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{4} + \frac{1}{6} + \frac{6+4}{24} \quad R = 2.4$$

por tanto, la resistencia total del circuito es:

$$R = 0.6 + 1 + 2.4 = 4$$

$$\text{corriente principal} = \frac{\text{fem}}{\text{resistencia total}} = \frac{12}{4} = 3A.$$

La dp a través de A y B (la corriente multiplicada por la resistencia combinada) es igual, entonces, a:

$$3 \times 2.4 = 7.2$$

Por lo tanto, la corriente a través de **A** es igual a:

$$\frac{\text{dp}}{\text{resistencia}} = \frac{7.2}{4} = 1.8A,$$

y la corriente a través de **B** resultará como sigue:

$$3 - 1.8 = 1.2A$$

RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

Cuando se fabrica un resistor, se emplea alambre grueso y corto si se quieren obtener bajas resistencias y, al revés, alambre delgado y largo si se desean resistencias altas. Además de la longitud y del espesor, existe otro factor importante que se debe tomar en cuenta cuando se toma la decisión de seleccionar la longitud y el calibre de alambre para una resistencia en particular: el material del que esté hecho el alambre.

Supongamos, por ejemplo, que la longitud de un alambre es duplicada, lo que duplica a su vez la resistencia, puesto que ahora la longitud del alambre equivale a dos resistencias iguales en serie. Si la longitud del alambre es aumentada cinco veces, la resistencia aumentará de igual manera su valor previo cinco veces. La resistencia de un alambre por lo tanto es directamente proporcional a su longitud, situación que formalizamos así:

$$R \propto l$$

Con respecto al espesor o área de sección transversal del alambre, los alambres gruesos pueden ser considerados como equivalentes a un número de alambres delgados de área transversal igual, que se encuentren unidos en paralelo. Al duplicarse el área, la resistencia del alambre disminuirá por tanto a la mitad. En otras palabras, la resistencia de un alambre es inversamente proporcional al área de su sección transversal (**A**):

$$R \propto \frac{1}{A};$$

si combinamos estos dos últimos resultados, tenemos:

$$R \propto \frac{1}{A}$$

Esta relación puede convertirse en una ecuación que introduzca una constante, de la siguiente manera:

$$R = \frac{\rho l}{A},$$

en donde ρ es una constante llamada resistividad del material del alambre. Si en esta ecuación damos a **l** un valor de **1 cm** y **A** vale **1 cm²**, tenemos:

$$R = \rho \times \frac{1 \text{ cm}}{1 \text{ cm}^2} = \frac{\rho}{1 \text{ cm}},$$

de donde: **$\rho = R \text{ (ohm x cm)}$**

Con esta fórmula, vemos que la resistividad de un material es expresada en una unidad ohm centímetro y es numéricamente igual a la resistencia de un conductor hecho de material con una longitud de 1 cm y de sección transversal de 1 cm².

Se puede decir también que la resistividad es una constante del material, lo cual es independiente de la forma geométrica del resistor. Por ejemplo, la resistencia que presenta un suelo al paso de la corriente eléctrica es una variable que depende, como dijimos anteriormente, de la longitud y del área transversal al flujo de corriente. Sin embargo, la resistividad de ese suelo tiene un valor fijo, e independiente del flujo de corriente, del área transversal y de

la longitud del terreno. Su valor sólo variará con la temperatura, el contenido de humedad, el de acidez y otros factores.

Lo contrario a la resistividad es la conductividad. Un material con alta conductividad tiene baja resistividad y viceversa. De esta manera se tiene que la *resistencia al flujo de corriente es mínima* cuando:

- a) el medio presenta baja resistividad (alta conductividad),
- b) existe una distancia pequeña para el flujo de corriente, y
- c) tenemos un área transversal grande para el flujo de corriente.

En cambio, la *resistencia al flujo de corriente es máxima* cuando:

- a) el medio presenta alta resistividad (baja conductividad),
- b) las distancias son grandes para el flujo de corriente, y
- c) el área transversal es pequeña para el flujo de corriente.

Las resistividades del suelo a menudo son mayores de **10 000 Ω -cm**. Las resistencias al flujo de corriente en sistemas de protección catódica en estos suelos pueden tener a veces valores menores a 1 ohm. La resistencia puede ser baja en un medio con una alta resistividad si el área transversal al flujo de corriente es grande.

CUADRO I. Valores de resistividad típicos para ciertos materiales.

<i>Material</i>	<i>Resistividad (Ω-cm)</i>
Aluminio	0.000003
Latón	0.000008
Hierro	0.000010
Plomo	0.000022
Mercurio	0.000094
Suelo típico	10 000
Vidrio	100 000 000 000
Agua de mar típica	30.00

CUADRO 2. Unidades eléctricas.

Ampere X segundo = coulomb

Volt X coulomb = joule

Volt X ampere = watt

Watt X segundo = joule

KW = Kilowatt = 1.341 HP

KWh = kilowatt = 1 000 watt / hora = 3 600 000 joules

HP = caballo de vapor = 746 watt = 0.746 KW

1 joule = 0.2387 calorías / gramo (cal)

1 cal = 4.183 joules

1 HPh = 1 caballo de vapor / hora = 641.7 kilocalorías

1 BTU = 1 054 joules