

Electrostática

Concepto y unidades de carga eléctrica

Se ha visto que en la naturaleza existen dos tipos de cargas: positiva y negativa, y que la cantidad más pequeña de carga es el electrón (que tiene la misma carga que el protón, pero de signo contrario). También, que existe una fuerza entre las cargas.

Teniendo en cuenta esto, se puede definir la unidad de carga eléctrica en dos sentidos: el **natural** y el **práctico**.

La unidad natural de carga eléctrica es el electrón, que es la menor cantidad de carga eléctrica que puede existir.

Como esta unidad es extremadamente pequeña para aplicaciones prácticas y para evitar el tener que hablar de cargas del orden de billones o trillones de unidades de carga, se ha definido en el **Sistema Internacional de Unidades** el coulombio:

- Un **coulombio** es la cantidad de carga que, a la distancia de 1 metro, ejerce sobre otra cantidad de carga igual, la fuerza de 9×10^9 Nw. K es una constante de proporcionalidad que depende del medio.
- La fuerza de 1 kg es igual a 9,8 Nw.

De esta definición resulta ser que:

$$1 \text{ coulombio} = 6,23 \times 10^{18} \text{ electrones}$$

Como el coulombio puede no ser manejable en algunas aplicaciones, por ser demasiado grande, se utilizan también sus divisores:

- 1 milicoulombio es la milésima parte del coulombio,

$$1 \text{ Cul} = 1.000 \text{ mCul}$$

- 1 microcoulombio es la millonésima parte del coulombio,

$$1 \text{ Cul} = 1.000.000 \text{ *Cul}$$

	Cul	mCul	μCul
1 Cul	1	10^3	10^6
1 mCul	10^{-3}	1	10^3
1 μCul	10^{-6}	10^{-3}	1

Ley de Coulomb

Se ha hablado de que existe una fuerza entre las cargas eléctricas, pero no se ha dicho nada sobre cuánto vale esa fuerza. La **Ley de Coulomb** nos da su valor:

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

Donde F es la fuerza –medida en newton (Nw)– ejercida en dos cargas de valores Q_1 y Q_2 (ambas en coulombios) separadas una distancia d (expresada en metros) y K es una constante universal que vale: 9×10^9 Nw.

Si las dos cargas son del mismo signo (positivas o negativas), la fuerza tiende a separarlas (fuerza de repulsión).

Si son de signo contrario (una positiva y otra negativa), la fuerza tiende a unir las (atracción).

Campo electrostático

Existen tantos tipos distintos de campos como orígenes de fuerzas:

- Campo gravitacional
- Campo eléctrico
- Campo magnético

En el tema que nos ocupa, los orígenes de fuerzas son las cargas. Por tanto:

- El campo eléctrico creado por una carga es la región del espacio en la que se manifiesta la acción de dicha carga.
- Esta acción se traducirá en fuerzas ejercidas sobre otras cargas.

En cualquier tipo de campo se define la **intensidad de campo**, o simplemente campo, como: “La fuerza ejercida sobre la unidad de carga”.

La intensidad de campo eléctrico se representa por la letra E y valdrá:

$$E = F \times Q$$

Donde F es la fuerza dada por la Ley de Coulomb; entonces, al dividir por Q se obtiene el campo eléctrico E.

$$E = K \times (Q / d^2)$$

Potencial y diferencia de potencial

Para explicar el potencial eléctrico servirá un símil mecánico.

En el **campo gravitacional**, las cargas “gravitacionales” son las masas. Una masa situada a cierta altura tiende a caer (atraída por la masa de la Tierra) y es capaz de desarrollar más trabajo cuanto más alta se la coloque; se dice, entonces, que tiene más potencial gravitacional.

En el campo eléctrico, esa “altura” eléctrica (esa capacidad de desarrollar un trabajo), se denomina **potencial eléctrico**, y las cargas tienden a “caer” desde los potenciales más altos a los más bajos, desarrollando un trabajo.

Como se desprende de la comparación gravitacional, el concepto de potencial es relativo (por ejemplo, cuando hablamos de la altura de un edificio,

nos referimos a la altura respecto a la calle, sin embargo, cuando hablamos de la altura de una montaña, nos referimos a la altura sobre el nivel del mar), por lo cual en algún punto habrá que fijar la referencia.

Igualmente, en electrostática hay que fijar un origen de potenciales que, por otra parte, será arbitrario. Algunas veces se toma como origen el potencial de la Tierra, y se dice entonces que la Tierra está a potencial cero. Otras veces el infinito se toma como punto de referencia.

De todos modos, lo que más interesa no es el potencial a que está la carga, sino la **diferencia de potencial**, es decir la “diferencia de alturas” o diferencia entre los potenciales de dos puntos entre los cuales se va a mover la carga.

Por tanto, se define la diferencia de potencial (d.d.p.) entre dos puntos como el trabajo que realiza la unidad de carga (el coulombio) al caer desde el potencial más alto al más bajo.

El potencial se representa con la letra V. El potencial del punto A se representa por V_A (V sub A), y $V_A - V_B$ (V sub A menos V sub B) o simplemente V_{AB} (V sub AB) es la diferencia de potencial entre el punto A y el punto B (en ese sentido y no al revés).

Ya que V_{BA} es igual a $-V_{AB}$ si V_{AB} es, por ejemplo, 5, V_{BA} será 25.

Los potenciales y diferencias de potencial, en el **Sistema Internacional**, se expresan en voltios.

Divisores más usuales del voltio

	voltio	mvoltio	μvoltio
1 voltio	1	10^3	10^6
1 mvoltio	10^{-3}	1	10^3
1 μvoltio	10^{-6}	10^{-3}	1

El múltiplo más usual es el kilovoltio. 1 KV = 1.000 V. A la diferencia de potencial también se le llama **voltaje** o **tensión**.

Electrodinámica

Corriente eléctrica

Se ha dicho que las cargas eléctricas pueden moverse a través de diferencias de potencial. Naturalmente, deben hacerlo por medio de los conductores.

A este movimiento de cargas se le denomina corriente eléctrica. La causa que origina la corriente eléctrica es la diferencia de potencial. Las cargas “caen” del potencial más alto al más bajo. Las únicas partículas que pueden desplazarse a lo largo de los conductores, debido a su pequeño tamaño, son los electrones, que son cargas de signo negativo.

La corriente eléctrica se mueve desde el potencial negativo, que es la fuente de electrones, hacia el positivo, que atrae las cargas negativas. Esta circulación recibe el nombre de corriente electrónica, para distinguirla de la corriente eléctrica, que fluye al revés, de positivo a negativo. Este último acuerdo fue tomado en los principios de la electricidad, por considerar que las cargas “caen” del potencial más alto al más bajo, cuando se creía que eran las cargas positivas las que se desplazaban. En la actualidad, coexisten ambos criterios, uno real y otro ficticio. A la hora de resolver circuitos puede aplicarse uno u otro, ya que ambos dan el mismo resultado.

Es evidente que no en cualquier circunstancia circulará el mismo número de electrones. Esto depende de la diferencia de potencial y de la conductividad del medio. Una forma de medir el mayor o menor flujo de cargas es por medio de la intensidad de corriente (**corriente**), que se define como la cantidad de carga que circula por un conductor en la unidad de tiempo (**segundo**).

$$I = Q / t \quad \text{o} \quad Q = I \times t$$

La intensidad de corriente eléctrica se expresa en amperios que, por definición, es el número de coulombios por segundo.

Los divisores más usuales del amperio son:

- El miliamperio (mA), que es la milésima parte del amperio: $1 \text{ A} = 1.000 \text{ mA}$
- El microamperio (μA), que es la millonésima parte del amperio: $1 \text{ A} = 1.000.000 \mu\text{A}$

	A	mA	μA
1 Amperio (A)	1	10^3	10^6
1 mAmperio (mA)	10^{-3}	1	10^3
1 μ Amperio (μA)	10^{-6}	10^{-3}	1

Ley de Ohm

Debe existir alguna relación entre la diferencia de potencial aplicada en los extremos de un conductor y la corriente que atraviesa ese conductor. Ohm encontró experimentalmente que esta relación era proporcional, es decir, que para un conductor dado, por ejemplo, al duplicar o triplicar la diferencia de potencial, se duplica o se triplica la corriente, respectivamente.

Cuando una corriente eléctrica atraviesa un conductor, crea en éste una diferencia de potencial directamente proporcional a la corriente. Esta constante

de proporcionalidad se denomina resistencia. La mayor o menor resistencia de un conductor es la mayor o menor dificultad que opone al paso de la corriente.

Y así se tienen buenos y malos conductores de corriente, en función de que posean una pequeña o alta resistencia, respectivamente. Los aislantes no conducen la corriente, por tanto tienen una resistencia altísima.

Al representar la resistencia del conductor con la letra R, la diferencia de potencial en los extremos del conductor con la letra V, y la corriente que circula por él, con la letra I, la **Ley de Ohm** se expresa como:

$$V = I \times R$$

$$I = V / R \quad \text{o} \quad R = V / I$$

La unidad de resistencia eléctrica es el ohmio, simbolizado por la letra griega Ω (*omega*).

Los múltiplos más usuales del ohmio son:

- El kilohmio es igual a 1.000 ohmios => 1 KW = 1.000 W
- El megaohmio es igual a 1.000.000 ohmios => 1 MW = 1.000.000 W

La resistencia de un conductor depende de sus dimensiones: es decir, tendrá más resistencia cuanto más estrecho y largo sea dicho conductor. Esto resulta

intuitivo si se considera la resistencia como la dificultad que opone al paso de la corriente.

Lo cual se expresa como:

$$R = \rho \epsilon \times l / S$$

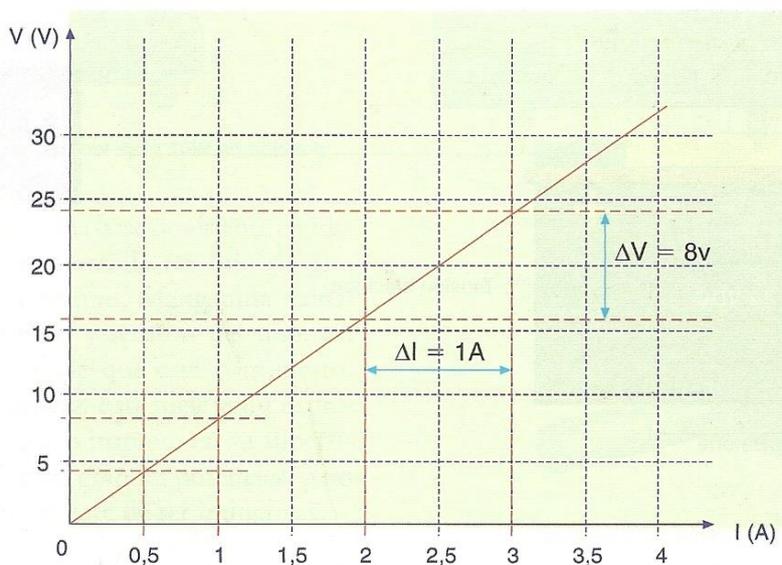
Donde:

- R es la resistencia medida en ohmios.
- l es la longitud medida en metros.
- S es la sección (área) transversal del conductor, en metros cuadrados.
- $\rho \epsilon$ es una constante que depende del material con que está fabricado el conductor, y se llama resistividad o resistencia específica del material en cuestión, y que da la resistencia por cada unidad de longitud y de sección. A veces se utiliza el inverso de la resistividad, al que se denomina conductividad.

$$\sigma = 1 / \rho \epsilon \quad \rho = 1 / \sigma \epsilon$$

Toda ley matemática puede representarse gráficamente por medio de un sistema de ejes coordenadas; en el eje horizontal (eje de abscisas o eje de las X) se representan los valores de una variable, y en el eje vertical (eje de ordenadas o eje de las Y) se representan los valores de la función que correspondan a los datos de la variable. De este modo se puede ver, por medio de la gráfica, el comportamiento de esa ley, lo que resulta ser un método rápido y sencillo.

Representación gráfica de la Ley de Ohm



Inyección electrónica

En la representación gráfica suponemos una determinada resistencia por la que se hacen circular distintas corrientes, produciéndose sendas caídas de potencial, de acuerdo con la tabla:

Para	0,5A	4V
Para	1A	8V
Para	2A	6V
Para	3A	24V

La línea que pasa por los puntos así formados es la representación gráfica de la función. En este caso la Ley de Ohm resulta ser una recta, y diremos que esta ley es lineal.

Una vez dibujada la función, en nuestro caso la recta, se pueden obtener de ella nuevos valores.

Por ejemplo, ¿qué caída de potencial se produce para una corriente de 2,5 A?

Respuesta (viendo el gráfico): 20 V.

¿Qué corriente circula cuando la diferencia de potencial es de 10 V?

Respuesta (viendo el gráfico): 1,25 A.

¿Cuánto vale la resistencia?

Respuesta:

$$R = \Delta V \times \Delta I$$

$$\Delta V = 8 \text{ V} \quad \Delta I = 1 \text{ A}$$

$$R = 8 \times R = 8 \Omega$$

Y este valor se obtiene para cualquier ΔV que elijamos de la gráfica.

Ejemplo de aplicación de la Ley de Ohm

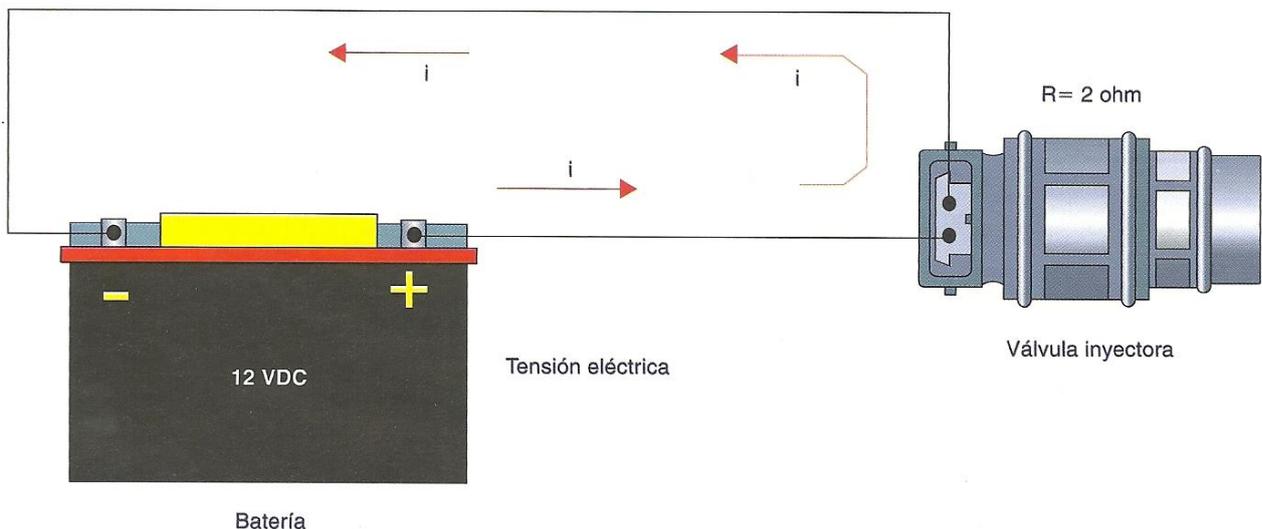
Si una válvula inyectora con resistencia eléctrica de 2 ohm está ligada a una batería de 12 vts, ¿cuál será el amperaje que circula por la válvula?

Tenemos: la resistencia de la válvula igual a 2 ohm y la tensión de la batería igual a 12 vts.

¿Al utilizar la Ley de Ohm?

$$I = V / R ; I = 12 / 2 ; I = 6 \text{ A}^*$$

Por tanto, la corriente que circulará por la válvula será de 6 A.

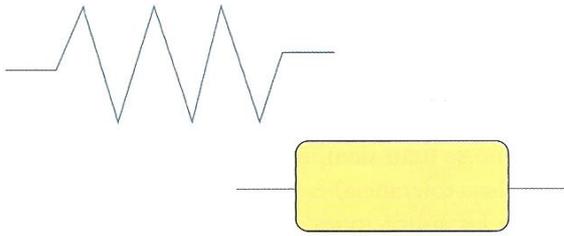


* Las corrientes por encima de 1A son consideradas altas; por tanto, la válvula corre el riesgo de quemarse.

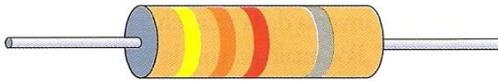
Resistencias (resistores)

Los circuitos electrónicos necesitan incorporar resistencias. Por esto se fabrica un tipo de componentes llamados resistores, cuyo único objeto es proporcionar en un pequeño tamaño una determinada resistencia, especificada por el fabricante.

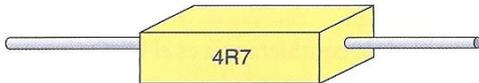
El símbolo de una resistencia puede ser:



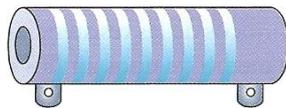
Hay resistencias de varios tipos. Los tipos más usuales son:



Resistencia de carbón de 0,25 a 4W



Resistencia bobinada cementada de 2 a 15W



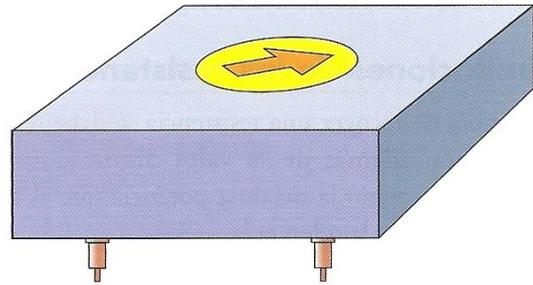
Resistencia bobinada de gran potencia 10W en adelante

- **Bobinadas:** sobre una base de aislante en forma de cilindro se arrolla un hilo de alta resistividad (Wolframio, Manganina, constantan). La longitud y sección del hilo, así como el material de que está compuesto, darán una resistencia. Ésta suele venir expresada por un número impreso en su superficie. Se utilizan para grandes potencias, pero tienen el inconveniente de ser inductivas.

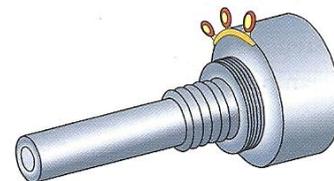
- **Aglomeradas:** una pasta hecha con gránulos de grafito (el grafito es una variedad del carbono puro; la otra es el diamante). El valor viene expresado por medio de anillos de colores, con un determinado código.
- **De película de carbón:** sobre un cilindro de cerámica se deposita una fina película de pasta de grafito. El grosor de ésta y su composición determinan el valor de la resistencia.
- **Pirólíticas:** similares a las anteriores, pero con la película de carbón rayada en forma de hélice para ajustar el valor de la resistencia. Son inductivas.

Resistencias variables

En ocasiones es necesario disponer de una resistencia cuyo valor se pueda variar a voluntad. Son los llamados reostatos o potenciómetros. Se fabrican bobinados o de grafito, deslizantes o giratorios. Se llaman potenciómetros cuando poseen un eje practicable, y resistencias ajustables cuando para variarlas se utiliza una herramienta.



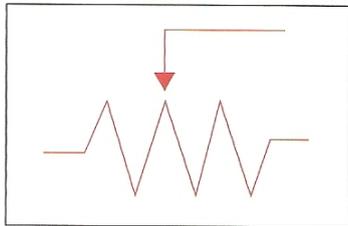
Resistencia ajustable



Resistencia variable - potenciómetro

Inyección electrónica

Los potenciómetros se representan en los circuitos por:



Resistencias especiales

Existen resistencias fabricadas con materiales especiales, comúnmente semiconductores, cuya resistencia no es constante, sino que depende de algún parámetro exterior. Por ejemplo:

- LDR: *Light Dependent Resistance*, Resistencia Dependiente de la Luz.
- VDR: *Voltage Dependent Resistance*, Resistencia Dependiente del Voltaje.
- PTC: *Positive Temperature Coefficient*, Coeficiente de Temperatura Positivo.
- NTC: *Negative Temperature Coefficient*, Coeficiente de Temperatura Negativo.

Limitaciones de las resistencias

A la hora de escoger una resistencia se debe tener en cuenta, además de su valor óhmico, otros parámetros, como la máxima potencia que es capaz de disipar y la tolerancia.

Respecto a la primera, es preciso considerar que una resistencia se calienta al pasar por ella una corriente. Debido a esto, hace falta dimensionar el resistor de acuerdo con la potencia calorífica que vaya a disipar en su funcionamiento normal. Se fabrican resistencias de varias potencias nominales, y se diferencian por su tamaño distinto.

La tolerancia es un parámetro que expresa el error máximo sobre el valor óhmico nominal con que ha sido fabricado un determinado resistor.

Por ejemplo, una resistencia de valor nominal 470 Ω con una tolerancia del 5%, quiere decir que el valor óhmico real de esa resistencia puede oscilar entre el valor nominal más el 5% del mismo, y el valor nominal menos el 5%.

Es decir, entre:

$$470 - 0,05 \times 470 = 446,5$$

$$470 + 0,05 \times 470 = 493,5$$

Si no se usan siempre resistencias de alta precisión (baja tolerancia) es porque el precio es elevado y para las aplicaciones normales es suficiente con una tolerancia relativamente alta.

Conductancia

La conductancia es una magnitud eléctrica que se define como la inversa de la resistencia y se representa con la letra G. Por analogía con la resistencia, podría decirse que la conductancia es la facilidad que un conductor ofrece al paso de la corriente a través de él.

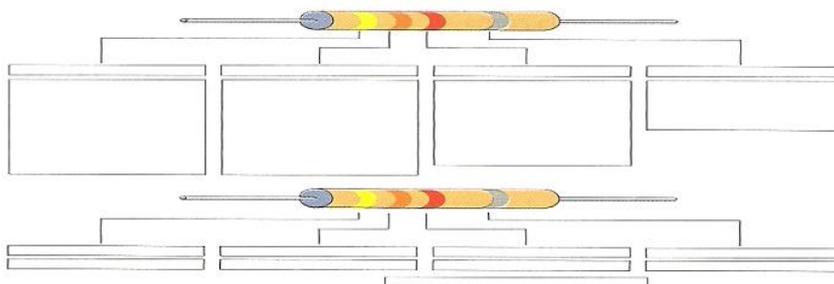
$$G = 1 / R \quad \text{o} \quad R = 1 / G$$

La unidad de conductancia es el MHO (inverso de ohm), y se representa por la letra omega invertida.

Código de colores

Los valores óhmicos de las resistencias se suelen representar por medio de unos anillos de color, pintados en éstas. Suelen ser en número de cuatro, y su significado es el siguiente:

- Anillo 1: 1ª cifra.
- Anillo 2: 2ª cifra.
- Anillo 3: número de ceros que siguen a los anteriores.
- Anillo 4: tolerancia.



1ª cifra		2ª cifra		Multiplicador		Tolerancia	
Negro	0	Negro	0	Negro	0	Marrón	0
Marrón	1	Marrón	1	Marrón	1	Rojo	1
Rojo	2	Rojo	2	Rojo	2	Oro	2
Naranja	3	Naranja	3	Naranja	3	Plata	10%
Amarillo	4	Amarillo	4	Amarillo	4	Sin color	20%
Verde	5	Verde	5	Verde	5		
Azul	6	Azul	6	Azul	6		
Violeta	7	Violeta	7	Oro	x0,1		
Gris	8	Gris	8	Plata	x0,01		
Blanco	9	Blanco	9				



1ª cifra	2ª cifra	Multiplicador	Tolerancia
4	3	00	± 10%

Valor resistencia = 4.300 ohmios ±10%

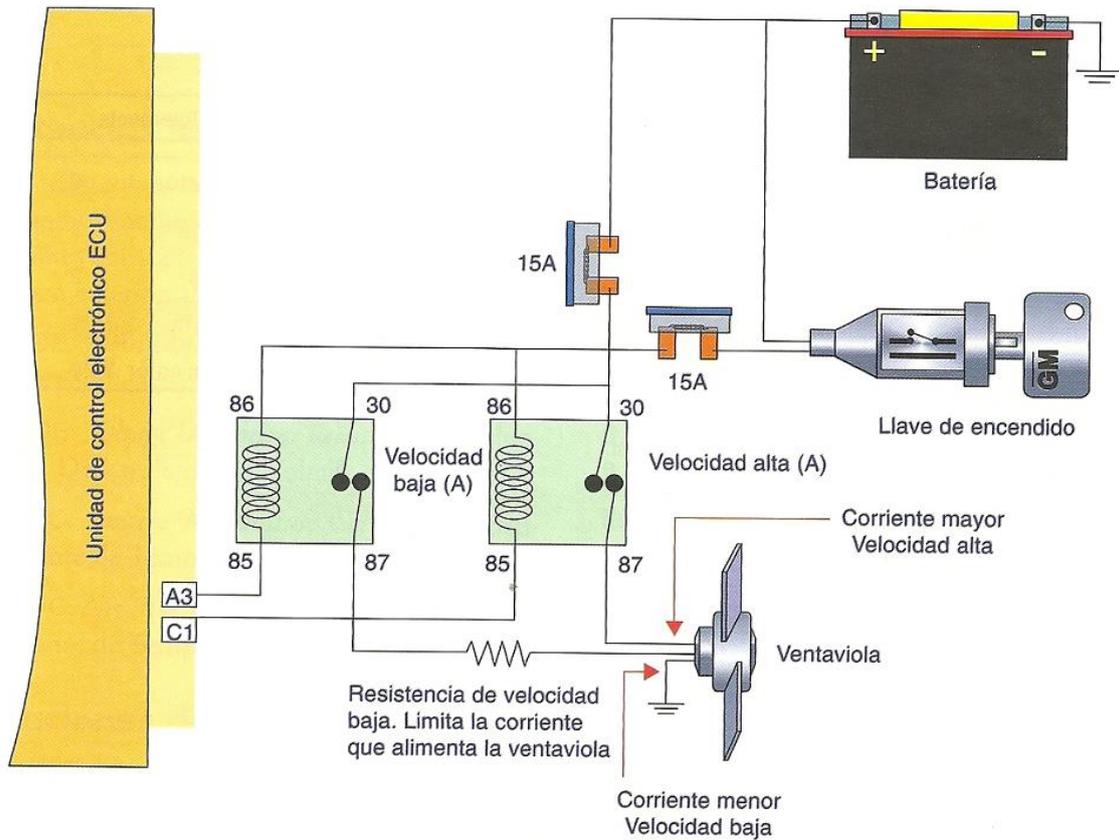
Inyección electrónica

Las resistencias del 1% llevan cinco bandas de color: cuatro para el valor y una para la tolerancia.

Las resistencias de valor inferior a 1W llevan la tercera banda de color oro, que representa la coma.

Por ejemplo: una resistencia de colores amarillo, violeta, oro, tiene un valor de 4,7W y una tolerancia del 5%.

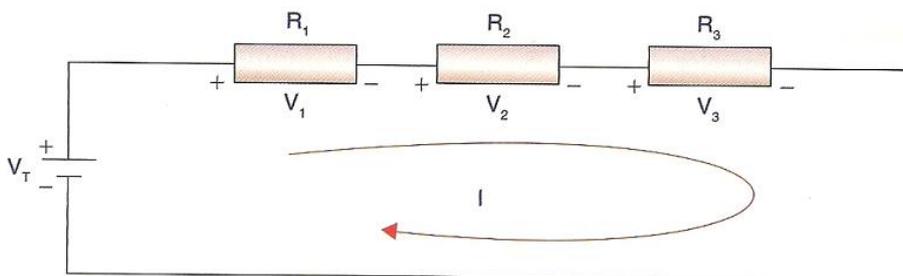
Utilización de resistencias (resistencia de velocidad baja de la ventaviola) Multec 700 TBI



Asociación de resistencias

Las resistencias pueden combinarse entre ellas en tres tipos de montaje: serie, paralelo y mixto.

Asociación en serie: se dice que varias resistencias están montadas en serie cuando el final de una está conectada al principio de la otra, como muestra la figura.



Cuando este conjunto se conecta a un generador con un voltaje V_T , por ejemplo, circulará por él una corriente I indicada por la flecha en la figura anterior.

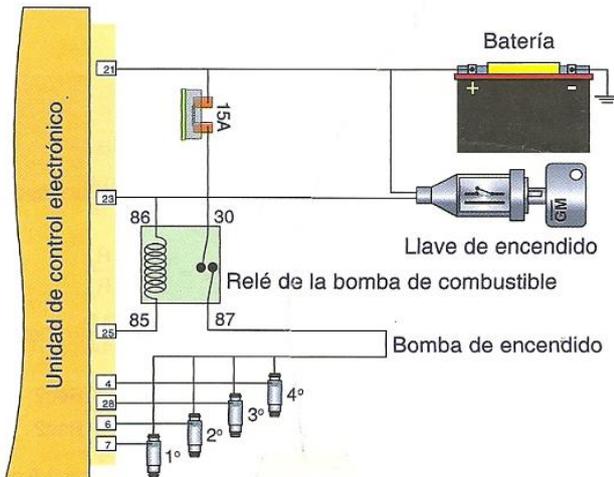
Pero obsérvese que esta **corriente** es la misma en todas las resistencias, ya que no hay más que un camino posible. En cambio, la **tensión** en cada resistencia será distinta (excepto en el caso de que las resistencias sean iguales), y de valor $V = I \times R$. La suma de todas las tensiones será igual a la del generador de valor V_T . El conjunto es equivalente a una sola resistencia de valor igual a la suma de todas ellas. (Al conectarlas en serie la dificultad al paso de la corriente aumenta).

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 = I \times R_1 + I \times R_2 + I \times R_3 \\ = I \times (R_1 + R_2 + R_3)$$

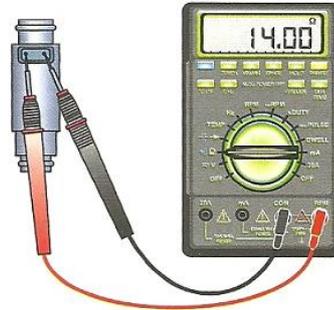
Por lo que:

$$V_T / I = R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

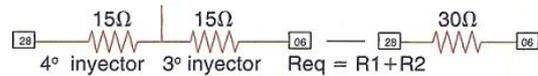
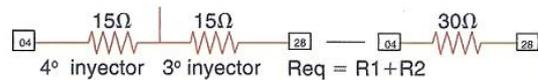
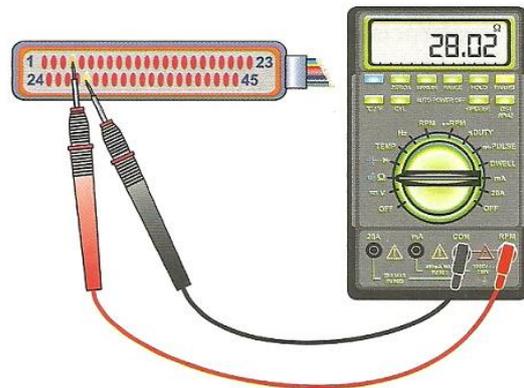
Es decir, que la resistencia total equivalente R_T es igual a la suma de todas las resistencias. En los sistemas de inyección electrónica secuencial multipunto, la medición de la resistencia eléctrica de los inyectores se puede hacer asociando en serie de dos, como se muestra en la gráfica siguiente del sistema Motronic MP 9.0.



La medición de la resistencia de un solo inyector debe estar entre 13 y 16 ohms.



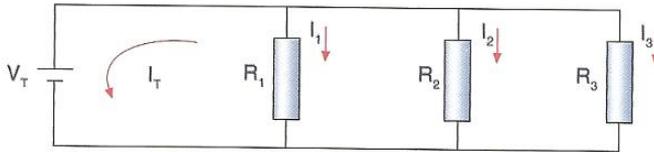
Al medir entre las terminales 4 y 28 de la ECU, la resistencia eléctrica debe estar entre 20 y 30 ohms.



Inyección electrónica

Asociación en paralelo: Se dice que varias resistencias están montadas en paralelo cuando tienen conectados todos los principios entre sí y todos los finales entre sí, como indica la figura.

Cuando a este conjunto se le conecta un generador, éste entregará una corriente; pero esta corriente se repartirá en varias, una por cada resistencia. La suma de todas las corrientes es igual a la corriente total, y cada una de ellas vale V/R . En cambio, la tensión en extremos de todas es la misma (la que suministra el generador).



Obsérvese que este caso es dual del anterior. Antes la tensión total del circuito era igual a la suma de las tensiones de cada una de las resistencias, ahora la corriente total que entrega el generador es la que es igual a la suma de las corrientes por cada una de las resistencias.

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 = V_T/R_1 + V_T/R_2 + V_T/R_3 \\ = V_T \times (1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3)$$

Por lo que:

$$I_T/V_T = 1/R_T = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$$

Es decir, que ahora la inversa de la resistencia total del circuito paralelo es igual a la suma de las inversas de cada una de las resistencias.

O también se puede decir:

$$G_T = G_1 + G_2 + G_3$$

La conductancia total del circuito es igual a la suma de las conductancias.

En el caso particular de que las resistencias asociadas en paralelo sean dos:

$$1/R_T = 1/R_1 + 1/R_2 = (R_2 + R_1) / R_2 \times R_1$$

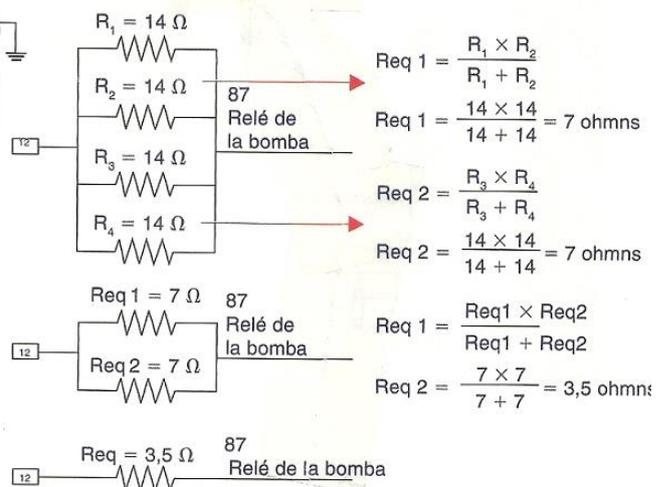
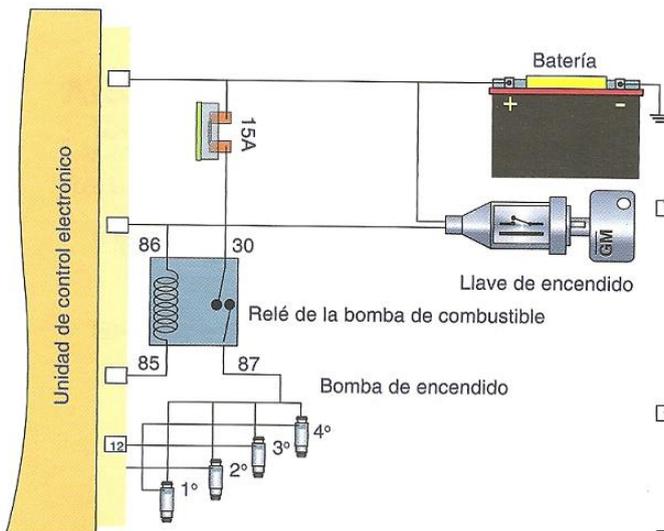
O sea:

$$R_T = R_1 \times R_2 / (R_1 + R_2)$$

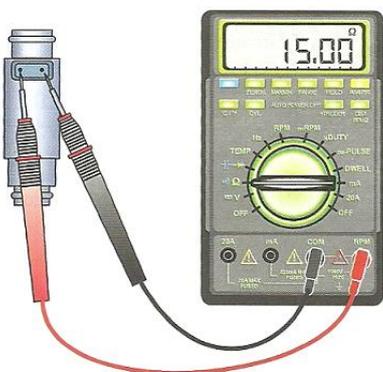
En este caso la resistencia total de dos resistencias es igual al producto de ellas dividida por la suma.

Esta fórmula se puede aplicar reiteradamente para cualquier número de resistencias (siempre que estén todas en paralelo) en vez de la fórmula general.

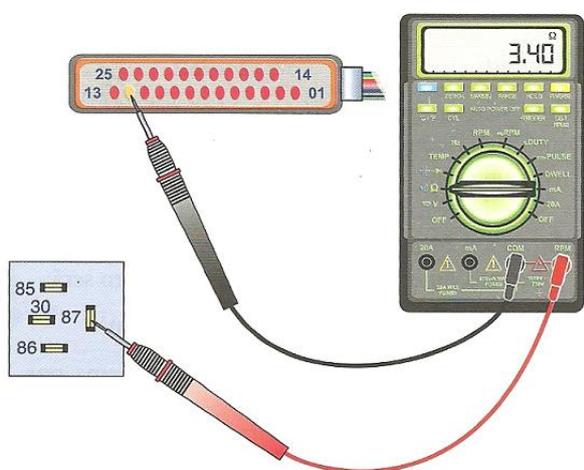
En los sistemas de inyección electrónica continua (sistemas multipunto poseen una misma terminal de la ECU para controlar los inyectores) la medición de la resistencia eléctrica de los inyectores se puede hacer asociando en paralelo de dos en dos, como se muestra en la gráfica siguiente del sistema Digifant MI.



La medición de la resistencia de un solo inyector debe estar entre 13 y 16 ohms.



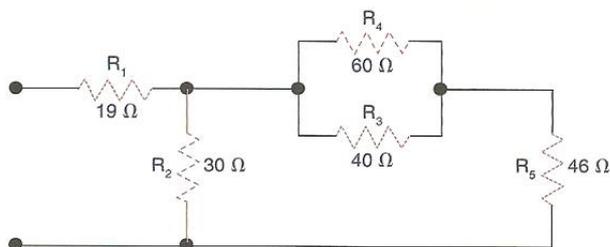
Al medir entre el relé y la terminal 12 de la ECU, la resistencia eléctrica debe estar entre 3,25 y 4 ohms.



Asociación mixta: pueden presentarse circuitos como combinación de los dos anteriores.

Ejemplo

En el circuito de la figura vamos a calcular la resistencia total:



1. $R_3 // R_4$ (observe que R_3 está en paralelo con R_4)

$$R_3 // R_4 = R_3 \times R_4 / (R_3 + R_4) \\ = 60 \times 40 / (60 + 40) = 24 \text{ W}$$

2. El paralelo de R_3 con R_4 se encuentra en serie con R_5

$$(R_3 // R_4) + R_5 = 24 + 46 = 70 \text{ W}$$

3. Este grupo se encuentra a su vez en paralelo con R_2

$$[(R_3 // R_4) + R_5] // R_2 \\ = 70 \times 30 / (70 + 30) = 21 \text{ W}$$

4. Y todo este grupo anterior está en serie con R_1

$$[(R_3 // R_4) + R_5] // R_2 + R_1 = 21 + 19 = 40 \text{ W}$$

Luego la resistencia total del circuito es:

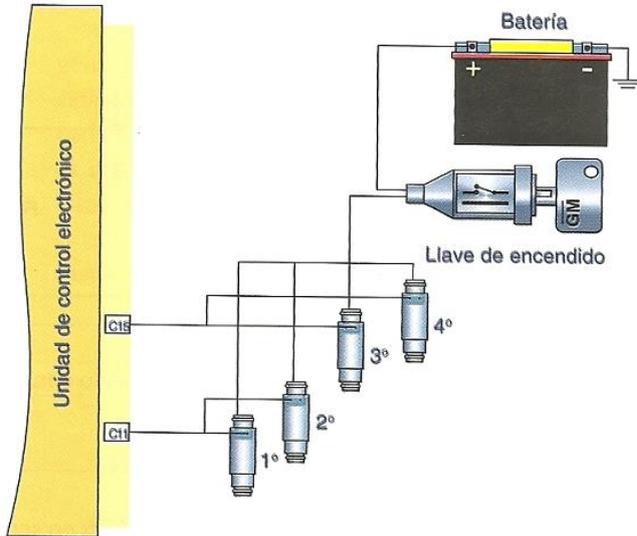
$$R_T = 40 \text{ W}$$

El siguiente método es considerado como el más cómodo:

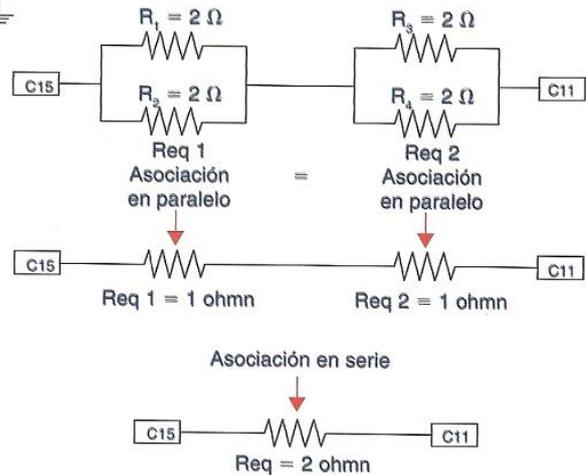
- Se comienza por reducir todos los paralelos del circuito aplicando la fórmula correspondiente.
- A continuación se reducen las resistencias que han quedado en serie.
- Se vuelven a reducir los nuevos paralelos que se han formado. Y así sucesivamente.

Inyección electrónica

En los sistemas de inyección electrónica semisecuenciales encontramos una asociación de resistencias en serie y paralelo simultánea-



mente (**asociación mixta**). Como lo muestra la gráfica del sistema Multec Delphi (Corssa MPFI).



Casos particulares:

1. Resistencias iguales en serie: con un número n de resistencias iguales de valor R en serie:

$$R_T = R + R + R + \dots (n \text{ veces})$$

$$\dots 1 R = n \times R$$

La resistencia total es igual a una de ellas multiplicada por el número de resistencias.

$$R_T = n \times R$$

2. Resistencias iguales en paralelo: con un número n de resistencias iguales de valor R en paralelo:

$$1/R_T = 1/R + 1/R + 1/R + \dots (n \text{ veces})$$

$$\dots + 1/R = n/R$$

Por lo que, la resistencia total es igual a una de ellas dividida por el número de resistencias.

$$R_T = R/n$$

Shunt

La asociación en paralelo se llama también derivación o *shunt*. Este último nombre se suele aplicar a

los montajes en los que es necesario limitar la corriente que atraviesa un determinado aparato de medida, es decir protegerlo, drenando el exceso de corriente por medio de una resistencia en paralelo.

Ejemplo

Construir un miliamperímetro de 5 miliamperios a fondo de escala con un galvanómetro de 100 microamperios y 50W de resistencia interna.

El galvanómetro es un aparato de medida que registra corrientes débiles y es la base de los polímetros.

La tensión en extremos del galvanómetro será:

$$V = I \times R = 100 \mu A \times 50 \Omega = 5 \text{ mV}$$

La tensión en extremos de R es la misma por estar en paralelo.

$$100 \mu A = 0,1 \text{ mA}$$

La corriente por R será:

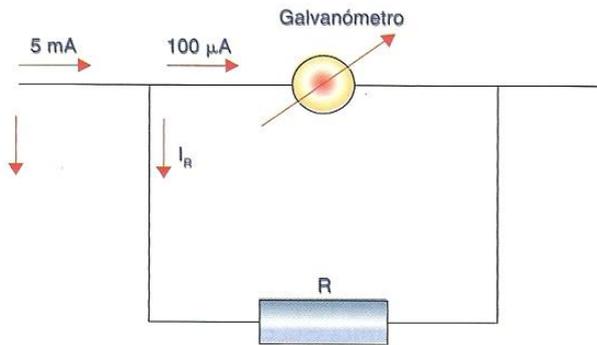
$$I_R = 5 \text{ mA} - 0,1 \text{ mA} = 4,9 \text{ mA}$$

Luego:

$$R = V/I = 5 \text{ mV} / 4,9 \text{ mA} = 1,02 \Omega$$

Resistencia de absorción

Cuando se quiere limitar la tensión que se aplica a un determinado circuito se conecta una resistencia en serie, llamada de absorción.



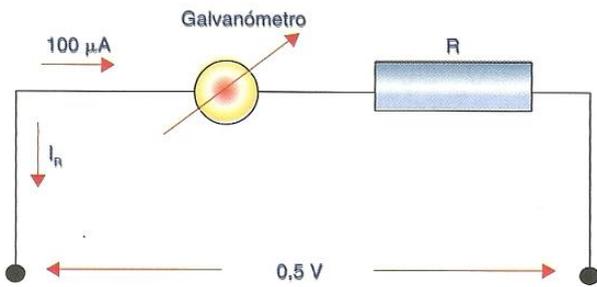
Ejemplo

Construir un voltímetro de 0,5 V a fondo de escala con el mismo galvanómetro del ejemplo anterior.

La tensión de máxima desviación del galvanómetro era:

$$100 \mu\text{A} \times 50 \Omega = 5 \text{ mV}$$

Por lo tanto en R aparecen



$$0,5 \text{ V} - 5 \text{ mV} = 495 \text{ mV}$$

La corriente que circula por R es la misma que la que circula por el galvanómetro, por estar en serie:

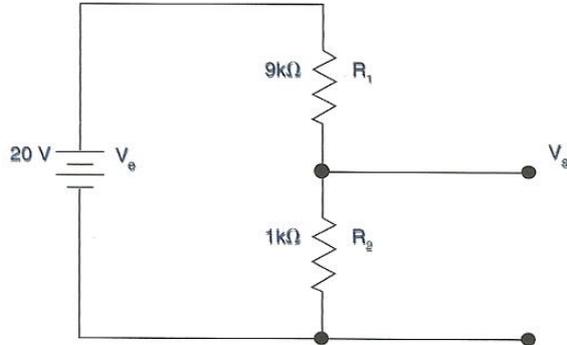
$$R = V / I = 495 \text{ mV} / 100 \mu\text{A} = 4950 \Omega$$

Divisor de tensión

Cuando se aplica una tensión a un circuito serie y se toma la diferencia de potencial en extremos de una de las resistencias, se obtiene un divisor de tensión,

ya que la salida es una fracción de la de entrada, y esa fracción viene determinada por la relación entre las resistencias.

Ejemplo



En el ejemplo de la figura:

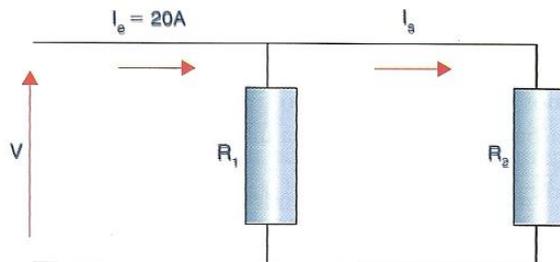
$$I = V_e / (R_1 + R_2)$$

$$V_s = I \times R_2 = V_e \times R_2 / (R_1 + R_2)$$

$$V_s = 20 \times 1 / (1 + 9) = 2 \text{ V}$$

Divisor de corriente

Cuando se aplica una corriente a un circuito paralelo y se toma la intensidad que circule por una de las resistencias, se obtiene un divisor de corriente, ya que la de la salida es una fracción de la corriente de entrada, esta fracción viene determinada por la relación entre las resistencias.



Ejemplo

$$V = I_e \times (R_1 // R_2) = I_e \times R_1 \times R_2 / (R_1 + R_2)$$

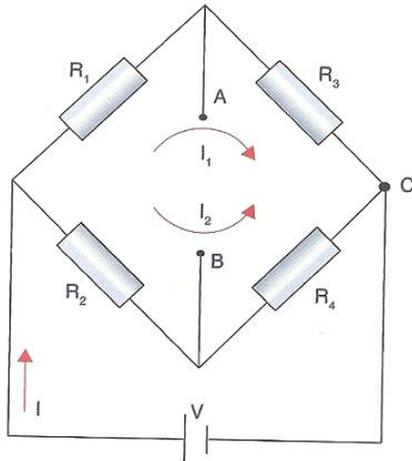
$$I_s = V / R_2 = I_e \times R_1 / (R_1 + R_2)$$

$$I_s = 20 \times 9 / (1 + 9) = 18 \text{ A.}$$

Inyección electrónica

Puente de Wheatstone

A un montaje como el de la figura siguiente se le denomina puente. Si dicho puente está formado por resistencias se le denomina **puente de Wheatstone**.



Para entender el funcionamiento de este circuito es necesario decir que:

Las diferencias de potencial son restas entre los potenciales de dos puntos; suponga que se encuentra al pie de una montaña que está a una altura C y asciende hasta el punto que tiene una altura A y mide la diferencia entre estas dos alturas:

$$H_A = \text{altura del punto A}$$

$$H_C = \text{altura del punto C}$$

La diferencia de alturas es $H_A - H_C$, que llamaremos H_{AC} , del mismo modo si asciende desde C hasta el punto B encontrará una diferencia de alturas $H_B - H_C$, que llamaremos H_{BC} .

¿Qué diferencia de alturas hay entre los puntos A y B?

La diferencia de alturas entre los puntos A y B, que llamaremos H_{AB} , es igual a la medida que hemos hecho en el primer recorrido H_{AC} , menos la medida en el segundo recorrido H_{BC} .

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} H_{AB} &= H_{AC} - H_{BC} = (H_A - H_C) - (H_B - H_C) \\ &= H_A - H_C - H_B + H_C = H_A - H_B \end{aligned}$$

Con los potenciales y diferencias de potencial ocurre lo mismo que con las alturas, y al reemplazar nos queda que:

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_{AC} - V_{BC} = (V_A - V_C) - (V_B - V_C) \\ &= V_A - V_C - V_B + V_C = V_A - V_B \end{aligned}$$

Entonces, para conocer la diferencia de potencial entre dos puntos A y B, se pueden medir por separado las tensiones respecto a un tercer punto de referencia C, y restarlas. Este método se usa mucho en la práctica y el punto de referencia común a todo un circuito suele llamarse masa; este punto de referencia puede tener cualquier valor por lo que se toma como tensión de referencia el punto de masa a 0 voltios. Se observa que en el caso de las alturas no importa a qué altura está el punto C si se conocen las diferencias de altura de A y B respecto a C.

Volviendo al circuito puente, se cumple como se dijo:

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_{AC} - V_{BC} = (V_A - V_C) - (V_B - V_C) \\ &= V_A - V_C - V_B + V_C = V_A - V_B \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_1 &= V / (R_1 + R_3) \geq V_{AC} = I_1 \times R_3 \\ &= V \times R_3 / (R_1 + R_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_2 &= V / (R_2 + R_4) \geq V_{BC} = I_2 \times R_4 \\ &= V \times R_4 / (R_2 + R_4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_{AC} - V_{BC} \\ &= V \times [(R_3 / (R_1 + R_3)) - (R_4 / (R_2 + R_4))] \end{aligned}$$

Se dice que el puente está equilibrado cuando la tensión en el punto A, V_A es igual a la tensión en el punto B, V_B , entonces $V_{AB} = 0$.

Suponga que el puente está equilibrado $V_{AB} = 0$.

En la última fórmula se ven dos términos que se restan, si esos dos términos son iguales, entonces $V_{AB} = 0$.

$$R_3 / (R_1 + R_3) = R_4 / (R_2 + R_4)$$

$$R_3 \times (R_2 + R_4) = R_4 \times (R_1 + R_3)$$

$$R_3 \times R_2 + R_3 \times R_4 = R_4 \times R_1 + R_4 \times R_3$$

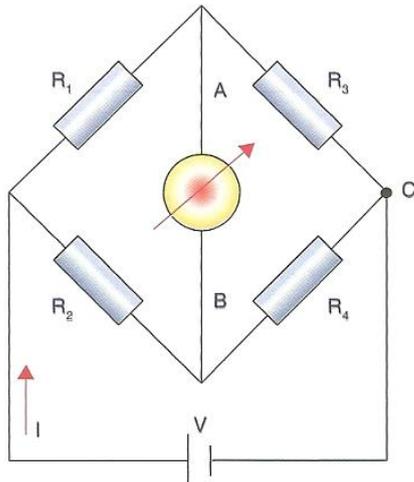
$$R_3 \times R_2 + R_3 \times R_4 = R_4 \times R_1 + R_4 \times R_3$$

Los términos resaltados son iguales y como están a ambos lados de la igualdad se restan y desaparecen.

$$R_3 \times R_2 = R_4 \times R_1 \text{ o } R_1 / R_2 = R_3 / R_4$$

El **punte de Wheatstone** tiene dos aplicaciones fundamentales:

Medida de resistencias de alta precisión



Tres de las resistencias R_1 , R_2 y R_3 son patrones de alta estabilidad y baja tolerancia, y una de ellas variable. La cuarta es la resistencia incógnita, a determinar su valor R_x . Observe que entre el punto A y B se conecta un galvanómetro (instrumento de medida de alta sensibilidad), el cual indicará si hay paso de corriente a través de él.

Ajustando los patrones R_1 , R_2 y R_3 hasta que el galvanómetro indique que no hay paso de corriente, en cuyo momento, claro está, el potencial en el punto A es igual al potencial en el punto B.

$$V_{AB} = 0, R_1 / R_2 = R_3 / R_4$$

Nuestra resistencia incógnita, que en vez de R_4 se ha llamado R_x , valdrá:

$$R_x = R_3 \times R_2 / R_1$$

R_2 / R_1 toma los valores 1.000, 100, 10, 1, 0.1, 0.01, 0.001 Es el multiplicador.

$R_x = R_3$ Variable. Es el ajustador.

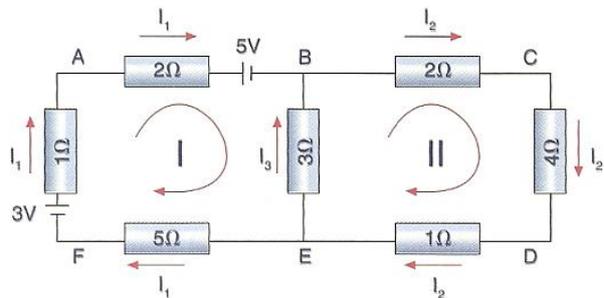
Punte de error

Si en el último puente se sustituye R_3 por una resistencia dependiente de un parámetro exterior (por ejemplo, una LDR, resistencia dependiente de luz), se puede utilizar el puente para medir las variaciones de ese parámetro, a través del desequilibrio del puente.

Leyes de Kirchoff

La fuerza electromotriz (f.e.m.) es la tensión que suministra un generador (**pila o batería**) cuando no se le conecta ninguna resistencia.

- **Concepto de malla:** se denomina malla en un circuito a cualquier camino cerrado.



En el ejemplo de la figura hay tres mallas:

- ABEF
- BCDE
- ABCDEF

El contorno de la malla está formado por ramas. Hay tres ramas:

- EFAB
- BE
- BCDE

- **Concepto de nodo:** se llama nodo en un circuito a cualquier punto en el que concurren más de dos ramas. En el ejemplo de la figura hay dos nodos: los puntos B y E.

Convenios

Se fijan en cada malla con un sentido de referencia arbitrario, que no tiene por qué ser el mismo en todas las mallas.

Inyección electrónica

En el ejemplo se ha escogido el sentido de las agujas del reloj para ambas. Basta con tomar las mallas que sean independientes. La ABCDEF no es independiente, porque está formada por las otras dos.

Se conviene en asignarle a los generadores signo positivo cuando tienden a producir corriente en el mismo sentido que el de referencia, y negativo en caso contrario.

Primera Ley de Kirchoff o Ley de mallas

A lo largo de una malla, la suma de fuerzas electromotrices es igual a la suma de las diferencias de potencial producidas en las resistencias.

Otra manera de expresarlo: la suma algebraica de las tensiones a lo largo de una malla es cero. Obsérvese que esta ley es la Ley de Ohm generalizada.

Segunda Ley de Kirchoff o Ley de nodos

En un nodo, la suma de las corrientes que entran es igual a las que salen. O la suma algebraica de corrientes en un nodo es nula.

Como aplicación, se resuelve el ejemplo de la figura anterior "Ley de mallas".

Se aplica la Primera Ley de Kirchoff a la malla I:

$$-3V + 5V = I_1 \times 1 + I_1 \times 2 + I_1 \times 5 - I_3 \times 3$$

$$2V = I_1 \times 8 - I_3 \times 3 \quad (I)$$

Luego la Primera Ley de Kirchoff a la malla II:

$$0V = I_2 \times 2 + I_2 \times 4 + I_2 \times 1 + I_3 \times 3$$

$$0V = I_2 \times 7 + I_3 \times 3 \quad (II)$$

Después la Segunda Ley de Kirchoff al nodo B:

$$I_1 + I_3 = I_2 \quad (III)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones (I) (II) (III).

$$I_1 = 20 / 101 = 0,198 \text{ A.}$$

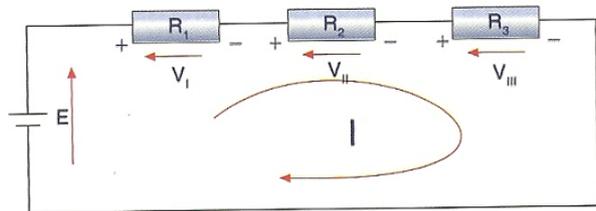
$$I_2 = 6 / 101 = 0,0594 \text{ A.}$$

$$I_3 = -14 / 101 = -0,138 \text{ A.}$$

El signo negativo de I_3 quiere decir que, en realidad, dicha corriente tiene sentido contrario al que hemos supuesto y dibujado en la figura "Ley de mallas".

Recuerde la asociación de resistencias en serie y paralelo:

Asociación en serie

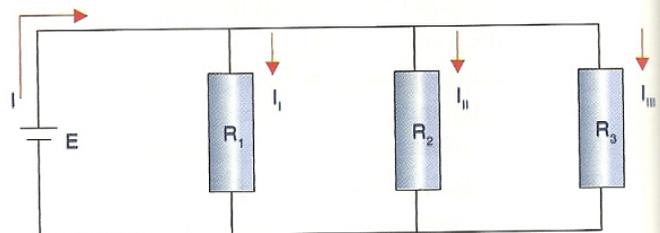


La flecha al lado de E significa que el generador nos eleva la tensión en el valor que tenga E. Las flechas puestas encima de las V_1, V_2, V_3 significan que la tensión disminuye en esos valores. La corriente I circula en el sentido del polo positivo de la batería al negativo atravesando las resistencias.

$$E = V_1 + V_2 + V_3$$

En este montaje tenemos una sola malla. No hay, por lo tanto, nodos. La corriente I que circula por la única malla es la misma para todas las resistencias. Lo que cambia es la tensión en cada una de ellas. La suma de todas las tensiones será igual a la f.e.m. E producida por el generador (Primera Ley de Kirchoff).

Asociación en paralelo



En este montaje hay varias mallas, apareciendo, por lo tanto, **nodos**. La tensión en extremos de todas las resistencias es la misma. Lo que cambia es la corriente a través de cada una de ellas. La suma de todas las corrientes será igual a la corriente total suministrada por el generador (Segunda Ley de Kirchoff).

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$