

## Table of Contents

|   |    |
|---|----|
| 1 La llei d'Ohm.....                                  | 2  |
| 1.1 Relació entre tensió, corrent i resistència.....  | 2  |
| 1.2 La potència elèctrica.....                        | 5  |
| 1.3 Resistències.....                                 | 8  |
| 1.4 Resistivitat, propietat física d'un material..... | 12 |
| 1.5 No linealitat de la resistència.....              | 14 |
| 1.6 El cableado del circuito.....                     | 19 |
| 1.7 Soluciones.....                                   | 22 |

# 1 La llei d'Ohm

## 1.1 Relació entre tensió, corrent i resistència

En un circuit elèctric, els electrons lliures circulen pels conductors que formen el circuit. Aquest moviment continu d'electrons lliures a través dels conductors es denomina corrent (flux, intensitat) elèctrica.

La força que causa el moviment d'electrons, es diu tensió i es mesura en volts. La tensió indica l'energia potencial entre dos punts del circuit. Sense referència a dos punts concrets del circuit elèctric, el terme "tensió" manca de sentit.

Per a crear un flux d'electrons lliures, cal aportar-los energia. Aquesta càrrega d'energia dels electrons és necessària, perquè els materials conductors del circuit oposen una resistència al seu pas. Aquesta resistència és comparable a la resistència que una canonada, o una mànega, oposen al pas de l'aigua que transporta.

Igual que la tensió, la resistència es mesura entre dos punts del circuit.

| Magnitud             | Símbol    | Unitat de mesura | Abreviació |
|----------------------|-----------|------------------|------------|
| Corrent (intensitat) | I         | Amperes          | A          |
| Tensió               | V o E o U | Volts            | V          |
| Resistència          | R         | Ohms             | $\Omega$   |

El voltatge és la mesura de l'energia potencial per unitat de càrrega que causa el flux d'electrons en el circuit. Abans de poder definir amb precisió el que és un "volt" convé entendre en un sentit més ampli el que és i com mesurar "l'energia potencial".

La unitat mètrica general per a l'energia de qualsevol tipus és el joule, que equival a la quantitat de treball realitzat per una força d'1 newton exercida sobre un objecte que és desplaçat 1 metre, estant orientats la força i la direcció del moviment (impuls) de l'objecte en el mateix sentit.

Definit en aquests termes científics, 1 volt equival a 1 joule d'energia potencial elèctrica per una determinada quantitat d'electrons (unitat de càrrega). Així, una pila de 9 volts allibera 9 joules d'energia per cada unitat de càrrega.

La primera relació, i potser la més important entre corrent, tensió i resistència es diu Llei d'Ohm, descoberta per Georg Simon Ohm i publicada en 1827. El principal descobriment d'Ohm va ser que la quantitat de corrent elèctric que travessa un conductor metàl·lic en un circuit és directament proporcional a la tensió i la resistència a temperatura constant.

Ohm va expressar el seu descobriment en forma d'una senzilla equació que descriu com s'interrelacionen el voltatge, el corrent i la resistència:

$$E = I \cdot R$$

E tensió en volts

I intensitat (corrent) en amperes

R resistència en ohms

## Resum

- Si la resistència és constant, el valor del corrent està determinat per la tensió. Un augment de la tensió causa un augment del corrent.
- Si la tensió és constant, el valor del corrent està determinat per la resistència. Si la resistència augmenta, el corrent disminueix.
- Si la intensitat és constant, el valor de la tensió està determinat per la resistència. Per a superar una resistència major, la tensió que actua sobre els electrons, l'energia que reben, ha de ser major.

**Exercici 1.1-1:**

A una font d'alimentació de 3 V es connecta una resistència de  $100 \, \Omega$

- a) Dibuixa un esquema del circuit.
- b) Calcula la intensitat.
- c) Calcula la potència en la resistència.

**Exercici 1.1-2:**

A una font d'alimentació de 5 V es connecten tres resistències en sèrie.

$R_1 = 100 \, \Omega$ ,

$R_2 = 200 \, \Omega$ ,

$R_3 = 300 \, \Omega$

- a) Dibuixa un esquema del circuit.
- b) Calcula la intensitat.
- c) Calcula la potència en les resistències.

## 1.2 La potència elèctrica

A més de la tensió i el corrent, existeix una altra magnitud característica en màquines elèctriques, la potència.

La potència és una mesura de la quantitat de treball que es pot realitzar en un temps determinat. Un exemple de treball és el d'aixecar un pes contra la força de la gravetat. Com més pesada sigui la càrrega i com més alt s'aixequi, més treball s'haurà realitzat. La potència és una mesura de la rapidesa amb la qual es realitza una unitat de treball. Com s'ha explicat anteriorment, la unitat del treball és el joule.

En els circuits elèctrics, la potència depèn tant de la tensió com del corrent. Es calcula multiplicant l'energia potencial (tensió) per la quantitat del flux d'electrons (corrent):  $P = I \cdot E$

P potència en W

I corrent en A

E tensió en V

Ha d'entendre's que ni la tensió, ni el corrent, constitueixen per si mateixes la potència.

Més aviat, la potència és la combinació de tensió i corrent. La tensió és el treball específic (o energia potencial) per unitat de càrrega, mentre que el corrent correspon al cabal de càrrega que circula pel conductor.

La tensió és anàloga al treball específic (J / m) realitzat en elevar una massa sobre la qual actua la força de gravetat. El corrent és anàleg a la velocitat (m/s) amb la qual es fa aquest treball. Junts, multiplicant voltatge per corrent, s'obté la potència.

Com en el cas del motor d'un tractor dièsel i el motor d'una motocicleta, un circuit amb alta tensió i baixa corrent pot estar dissipant la mateixa quantitat de potència que un circuit amb baixa tensió i alt corrent. Ni la tensió ni el corrent indiquen per si soles la potència d'un circuit.

En un circuit obert, en el qual hi ha tensió entre els terminals de la font i el corrent és zero, la potència dissipada és zero, per molt alta que sigui la tensió (  $P = I \cdot E$  i  $I = 0$  ). Sabem que qualsevol valor multiplicat per zero és zero. La potència dissipada en un circuit obert és zero. Un circuit obert equival a càrrega (motor, llum) desconnectada.

Si tinguéssim un curtcircuit construït amb un superconductor (de resistència zero), es podria mantenir un corrent sense voltatge, és a dir, voltatge zero. En aquest cas, tampoc es dissiparia energia. La potència dissipada en una espira superconductora ha de ser zero.

Un motor elèctric transforma energia elèctrica en energia mecànica. La potència elèctrica es mesura en W en tot el món, la mecànica no. Hi ha països en els quals la potència mecànica es mesura en cavalls de vapor (CV, HP). El factor de conversió de CV a W és el següent:

$$1 \text{ CV} = 745,7 \text{ W}$$

### Resum

- La potència és la quantitat de treball que es realitza en un temps determinat.
- La potència mecànica s'expressa en diverses unitats.
- La potència elèctrica sempre s'expressa en W i pot calcular-se mitjançant la fórmula  $P = I \cdot E$  .
- Els cavalls de vapor (CV, HP) i els watts (W) són dues unitats diferents per a descriure la potència. 1 cavall de vapor equival a 745,7 watts.

**Exercici 1.2-1:**

En una resistència de  $500\ \Omega$  es mesura un corrent de  $0,1\ \text{A}$ .

Calcula la tensió que cau en la resistència i la potència dissipada.

**Exercici 1.2-2:**

En una resistència de  $500\ \Omega$  cau una tensió de  $20\ \text{V}$ .

Calcula el corrent que circula per la resistència i la potència dissipada.

## 1.3 Resistències

Atès que la relació entre voltatge, corrent i resistència en qualsevol circuit és proporcional, podem determinar qualsevol variable d'un circuit coneixent les altres dues. Potser la variable més fàcil d'ajustar en qualsevol circuit és la seva resistència. Això pot fer-se canviant el material, la grandària i la forma dels seus components conductors. Per exemple el gruix de l'un fil conductor i la seva longitud, determinen la seva resistència.

Els components anomenats resistències, es fabriquen amb un valor precís de resistència per a la seva inserció en un circuit. Solen estar fets de filferro metàl·lic o carboni, i estan dissenyats per a mantenir un valor de resistència estable en un ample ventall de condicions ambientals.

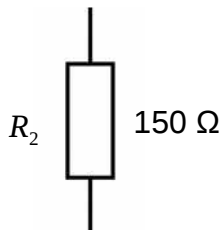
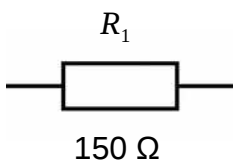
A diferència dels llums, no produeixen llum, però sí calor, ja que dissipen energia elèctrica en el seu interior. No obstant això, en un circuit electrònic, el propòsit d'una resistència no és produir calor utilitzable, sinó mantenir un valor determinat i constant de resistència elèctrica.

En els esquemes elèctrics, una resistència es representa amb un dels següents símbols:



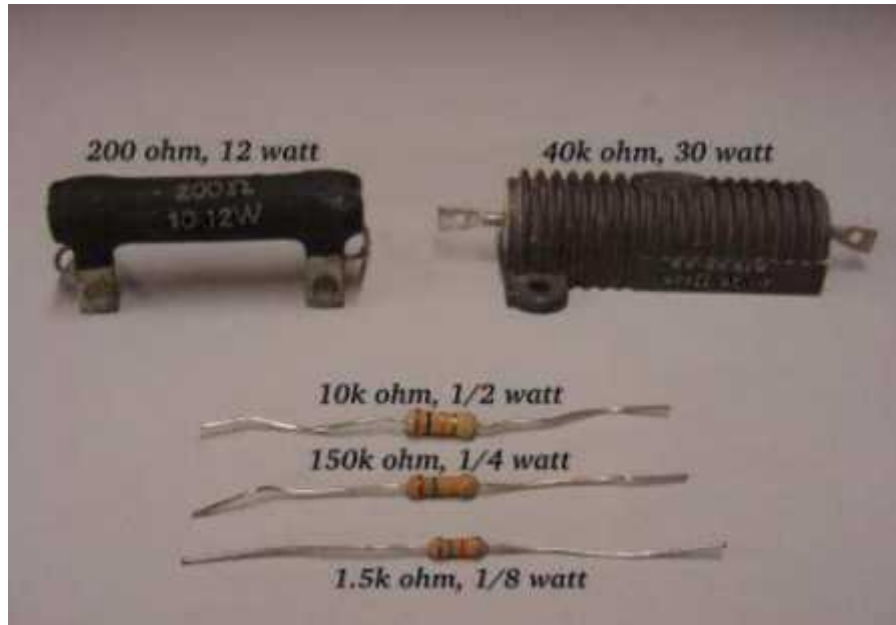
Els valors de les resistències en ohms solen indicar-se amb un número adjacent, i si hi ha diverses resistències en un circuit, s'identificaran amb  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , etc.

Les resistències poden representar-se horitzontal o verticalment.



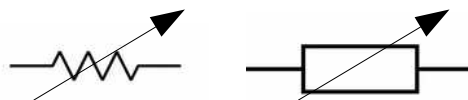


La següent imatge mostra diverses resistències.



Les resistències poden ser ajustables, en comptes de fixes. Una resistència ajustable es representa incloent una fletxa que creua el símbol de la resistència.

Resistències ajustables



De fet, un símbol de component dibuixat amb una fletxa diagonal travessant-lo, significa que aquest component té un valor variable en lloc de fix. Aquest símbol "modificador" (la fletxa diagonal) és una convenció electrònica estàndard.

Les resistències variables han de tenir algun medi físic d'ajust, ja sigui un eix giratori o una palanca que pugui moure's per a ajustar el valor de la resistència. La següent fotografia mostra uns components anomenats potenciòmetres, en els quals la resistència és ajustable:



Atès que les resistències dissipen energia tèrmica quan els corrents elèctrics que les travessen superen la "fricció" al seu pas, també es classifiquen segons de la quantitat d'energia tèrmica que són capaces de dissipar sense sobreescalfar-se ni sofrir danys.

Aquesta potència nominal s'especifica en watts (W). La majoria de les resistències que es troben en petits dispositius electrònics com a ràdios portàtils tenen una potència nominal de  $\frac{1}{4}$  (0,25) watt o menys. La potència nominal de qualsevol resistència es pot estimar per la seva grandària física. En la primera fotografia s'aprecia com les potències nominals augmenten amb la grandària. A major grandària de la resistència, major és la seva capacitat per a dissipar potència. Observi's també com el valor de les resistències (en ohms), no té res a veure amb la grandària física.

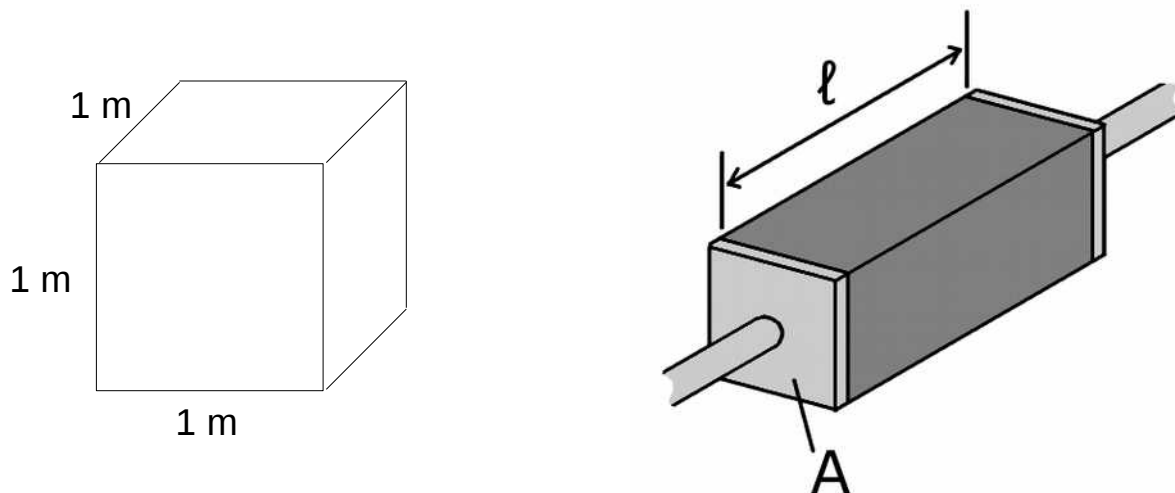
## Resum

- Les resistències es fabriquen amb valors precisos per a ser utilitzades en els circuits elèctrics.
- Les resistències es classifiquen tant per la seva resistència (ohms) com per la seva capacitat de dissipar energia tèrmica (watts).
- El valor nominal en ohms d'una resistència, no pot determinar-se a partir de la seva grandària física. El que sí que pot determinar-se aproximadament per la seva grandària és la seva capacitat de dissipar potència. A major grandària, major potència podrà dissipar sense sofrir danys.
- Qualsevol dispositiu que aprofiti l'energia elèctrica es denomina càrrega. A vegades s'utilitza el símbol de la resistència en un diagrama elèctric per a designar una càrrega no específica.

## 1.4 Resistivitat, propietat física d'un material

Els materials tenen una propietat física anomenada resistivitat  $\rho$ , que indica la resistència en ohms per metre lineal del material, considerant una secció de  $1\text{ m}^2$ .

Un objecte d'1 m de llarg amb una secció de  $1\text{ m}^2$ , es pot representar com un cub d'1 m x 1 m x 1m.



La següent taula mostra els valors de resistivitat per a diversos materials.

| nom del metall         | resistivitat ( $\Omega \cdot \text{m}$ ) | coeficient de variació tèrmic ( $\text{K}^{-1}$ ) |
|------------------------|--|---|
| Argent <sup>[1]</sup>  | $15,9 \cdot 10^{-9}$                     | 0,0038  |
| Coure                  | $16,8 \cdot 10^{-9}$                     | 0,003862  |
| Or <sup>[1]</sup>      | $24,4 \cdot 10^{-9}$                     | 0,0034  |
| Alumini <sup>[1]</sup> | $28,2 \cdot 10^{-9}$                     | 0,0039  |
| Bronze                 | $50 \cdot 10^{-9}$                       |   |
| Plati <sup>[1]</sup>   | $106 \cdot 10^{-9}$                      | 0,00392   |
| Ferro <sup>[1]</sup>   | $100 \cdot 10^{-9}$                      | 0,005   |
| Estany                 | $109 \cdot 10^{-9}$                      | 0,0045  |
| Plom <sup>[1]</sup>    | $220 \cdot 10^{-9}$                      | 0,0039  |

Font: <https://ca.wikipedia.org/wiki/Resistivitat>

La resistència d'un conductor depèn de la seva longitud i la seva secció.

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

R      resistència en  $\Omega$

$\rho$       resistivitat en  $\Omega \cdot m$

l      llargària del conductor

A      secció del conductor en  $m^2$

Per exemple, un conductor de plata de 10 m de llarg i  $1 \text{ mm}^2$  de secció, presentarà una resistència de

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{1,59 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m \cdot 10 \text{ m}}{10^{-6} m^2} = 1,59 \cdot 10^{-1} \Omega = 0,159 \Omega$$

#### Exercici 1.4-1

Calcula la resistència d'un conductor d'alumini de 5 m de llarg i  $2 \text{ mm}^2$  de secció.

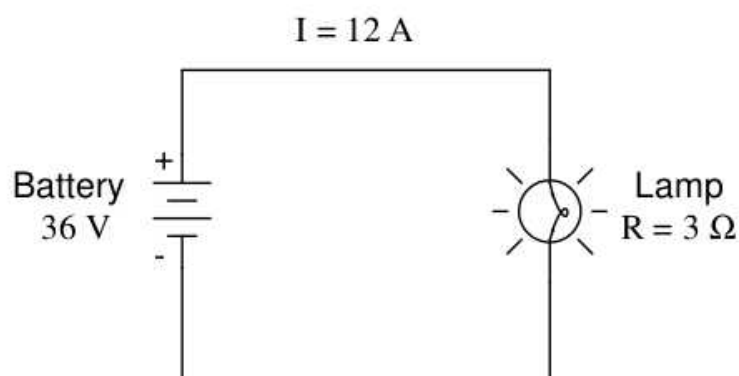
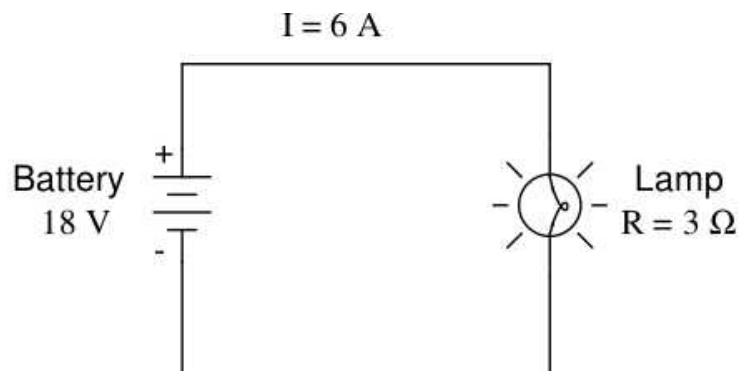
## 1.5 No linealitat de la resistència

La llei d'Ohm és una eina matemàtica senzilla i poderosa que ens ajuda a analitzar els circuits elèctrics, però té les seves limitacions i hem de conèixer-les per a aplicar-la correctament als circuits reals.

Per a la majoria dels conductors, la resistència és una propietat bastant estable, que no es veu afectada per la tensió o el corrent. Per aquesta raó, podem considerar la resistència de molts components del circuit com una constant, independent de tensió i corrent.

Per exemple, en un circuit amb un llum de  $3\ \Omega$ , calculem el corrent a través del circuit dividint la tensió per la resistència ( $I=E/R$ ). Amb una bateria de 18 volts, el corrent del nostre circuit serà de 6 amperes. Duplicant el voltatge de la bateria a 36 volts, el corrent es duplica a 12 amperes.

Tot això té sentit, sempre que el llum continuï proporcionant exactament la mateixa quantitat de fricció (resistència) al flux d'electrons:  $3\ \Omega$ .



No obstant això, la realitat no sempre és tan senzilla. En un llum incandescent, que mitjançant el corrent elèctric escalfa un filament metàl·lic fins que brilla roent, la resistència del conductor canvia amb la temperatura. De fet, la resistència del filament augmentarà dràsticament a mesura que s'escalfa des de la temperatura ambient fins a la temperatura de funcionament.

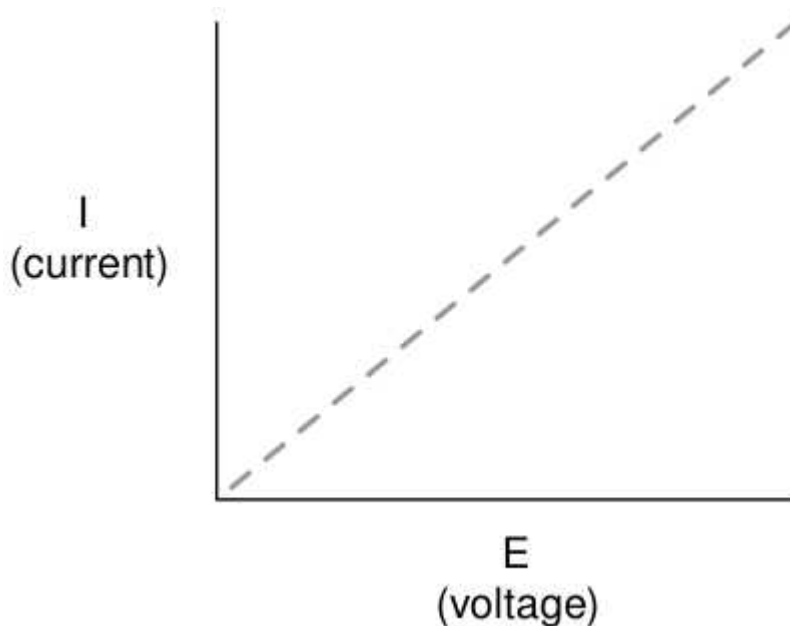
Si augmentéssim la tensió d'alimentació en un circuit amb un llum real, l'augment de corrent resultant provocaria un augment de la temperatura del filament, la qual cosa al seu torn augmentaria la seva resistència, implicant així nous augments de corrent sense que augmenti la tensió. Això significa que la tensió i el corrent no segueixen l'equació simple " $I=E/R$ " (suposant que  $R$  és igual a  $3\ \Omega$ ) perquè la resistència del filament d'un llum incandescent no és igual a  $3\ \Omega$ .

La resistència del filament d'un llum incandescent no roman constant per a diferents corrents.

El fenomen de la variació de la resistència amb les variacions de temperatura és comú a gairebé tots els metalls, dels quals estan fets la majoria dels cables conductors. Generalment aquests canvis són prou petits com per a ignorar-los. No obstant això, en els filaments de llums incandescents, l'augment de resistència és bastant gran.

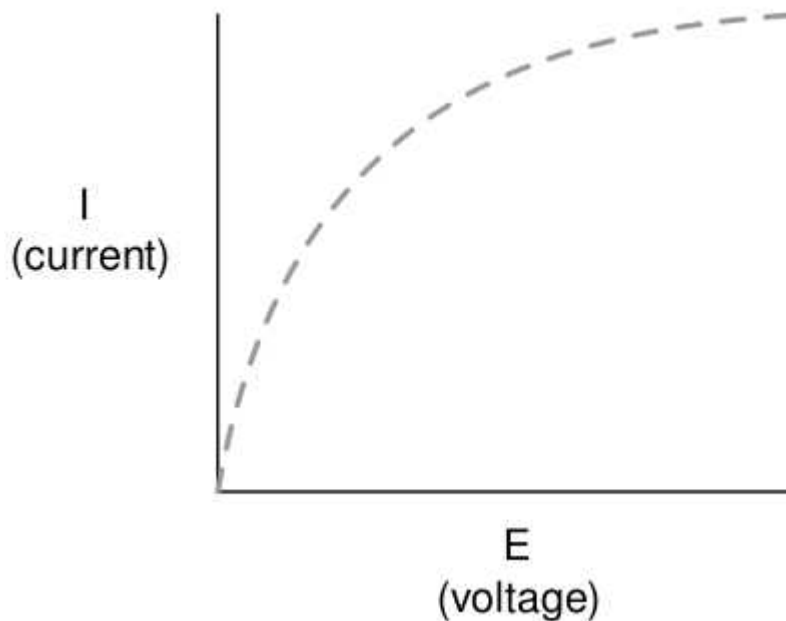
Aquest és només un exemple de "no linealitat" en els circuits elèctrics. No és l'únic exemple.

Una funció "lineal" en matemàtiques és aquella que segueix una línia recta quan es representa en un gràfic. La versió simplificada del circuit del llum amb una resistència de filament constant de  $3\ \Omega$  es representaria amb un gràfic com aquest:



El traçat rectilini del corrent sobre la tensió indica que la resistència és un valor constant (invariable) per a una àmplia gamma de tensions i corrents. En una situació "ideal", aquest és el cas. Les resistències, que es fabriquen per a proporcionar un valor definit i estable de resistència, s'aproximen molt al gràfic anterior. Un matemàtic anomenaria el seu comportament "lineal".

Fent una anàlisi més realista d'un circuit amb un llum amb diferents tensió de bateria, el gràfic resultant seria semblant al següent:

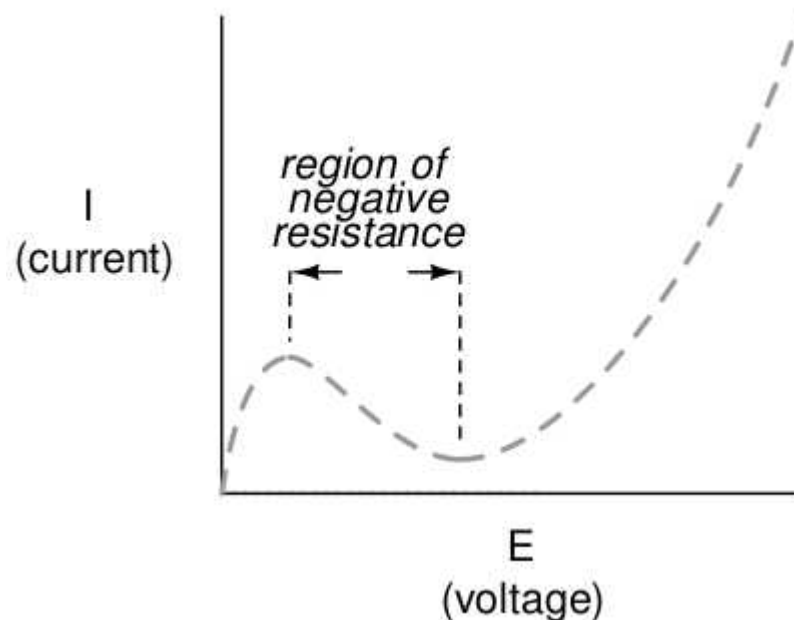


El gràfic ja no és una línia recta. El seu pendent és pronunciat en el costat esquerre, però va disminuint a mesura que augmenta la tensió.

Intentant aplicar la Llei d'Ohm per a trobar la resistència del llum amb els valors de tensió i el corrent, s'obtenen valors diferents. La resistència no és lineal, sinó que augmenta en augmentar el corrent i la tensió. La no linealitat és causada l'alta temperatura del filament del llum.



Altres components elèctrics presenten corbes de corrent/tensió encara més estranyes que aquesta. Alguns dispositius experimenten una disminució del corrent a mesura que augmenta la tensió aplicada. Aquest fenomen es coneix com a resistència negativa, ja que el pendent de la relació corrent/tensió és negativa (descendeix en lloc d'augmentar a mesura que avança d'esquerra a dreta).



En particular, els tubs d'electrons (vàlvules) d'alt buit, coneguts com tetrodos, i els díodes semiconductors coneguts com Esaki (díodes túnel) presenten una resistència negativa per a determinats rangs de voltatge. La llei d'Ohm no és útil per a analitzar el comportament de components com aquests, en els quals la resistència varia amb la tensió i el corrent.

S'ha suggerit que la "Llei d'Ohm" hauria de perdre el seu estatus de "lleï" per no ser universal. Seria més exacte dir que l'equació ( $R=E/I$ ) és una definició de resistència, aplicable a una determinada classe de materials en determinades condicions.

No obstant això, en els exemples i exercicis d'aquests apunts, se suposarà que les resistències són constants tret que s'especifiqui el contrari.

És important recordar que en els exemples i exercicis s'està simplificant la realitat, substituint-la per equacions senzilles. La realitat no és matemàtica, no obstant això les matemàtiques ajuden a descriure la realitat.

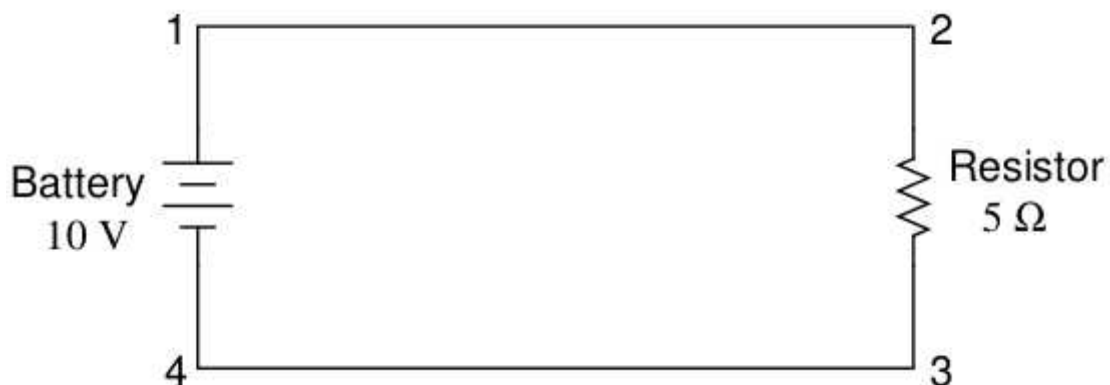
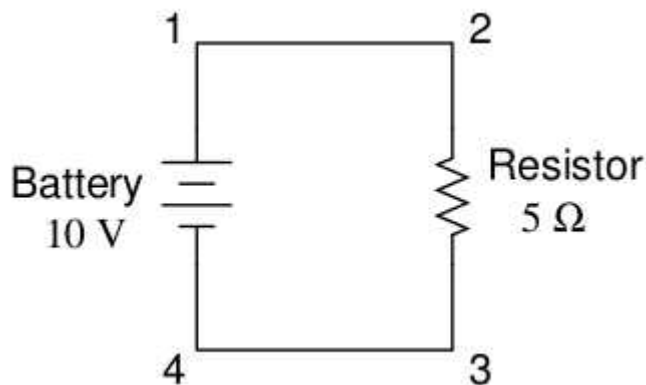
## Resum

- La resistència de la majoria dels materials conductors és estable en una àmplia gamma de condicions, però existeixen excepcions .
- Qualsevol funció que pugui representar-se en un gràfic com una línia recta es denomina funció lineal.
- En circuits amb resistències constants, el gràfic del corrent en funció de la tensió és lineal ( $I=E/R$ ).
- En circuits en els quals la resistència varia amb els canvis de tensió o corrent, el gràfic del corrent en funció de la tensió no és lineal ( $I=E/R$ ) → línia corba.
- La resistència negativa és aquella en la qual el corrent que travessa un component disminueix en augmentar la tensió aplicada a través d'ell. Alguns tubs d'electrons i díodes semiconductors presenten una resistència negativa en un determinat rang de tensions.

## 1.6 El cableado del circuito

Hasta ahora, hemos estado analizando circuitos con una batería y una sola resistencia, sin tener en cuenta los cables de conexión entre batería y resistencia.

¿Importa la longitud de los cables o la "forma" del circuito?



Normalmente se desprecia la resistencia de los cables que conectan los componentes de un circuito, por lo que la única resistencia que se considera es la de los componentes electrónicos o máquinas presentes en el circuito.

En realidad, los cables conductores utilizados para la conexión de los componentes tienen resistencia (¡y las fuentes de alimentación también!), pero no se considera.

El motivo por el que se desprecian las resistencias del cableado de conexión es que debe ser mucho menor al de los componentes del circuito. Si no lo fuera, no debería despreciarse su resistencia.

Esto sucede por ejemplo en el cableado utilizado para transportar la energía eléctrica, donde incluso una resistencia muy pequeña del conductor puede provocar caídas de tensión significativas debido a los altos valores de corriente.

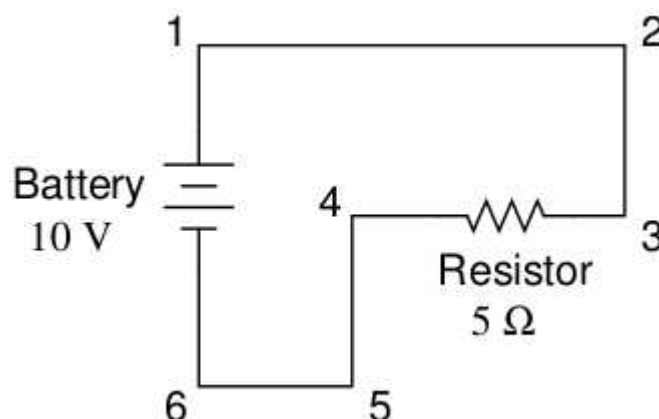
Si la resistencia del cable de conexión es muy pequeña o nula, se considera que los puntos conectados de un circuito son eléctricamente comunes. Es decir, los puntos 1 y 2 de los circuitos anteriores pueden estar físicamente unidos o alejados. Su distancia no influye en la medición del voltaje o de la resistencia entre ellos. Lo mismo ocurre con los puntos 3 y 4. Es como si los extremos de la resistencia se conectaran directamente a los terminales de la batería. Es útil saber que se pueden dibujar el esquema de un circuito con líneas de cualquier longitud y también a la hora de realizar el cableado, se puede elegir la longitud de cable más apropiada para el lugar del montaje, sin que ello afecte de forma apreciable al funcionamiento del circuito.

Lo único importante es que los componentes se conecten entre sí en la misma secuencia.

También significa que las mediciones de tensión entre conjuntos de puntos "eléctricamente comunes" será la misma. Es decir, la tensión entre los puntos 1 y 4 (directamente a través de la batería) será igual que la tensión entre los puntos 2 y 3 (directamente a través de la resistencia).

### Ejercicio

En el siguiente circuito ¿qué puntos son comunes entre sí (se mide una tensión de 0 V entre ellos )?



Dado que los puntos eléctricamente comunes están conectados entre sí por un cable (de resistencia nula), no hay una caída de tensión significativa entre ellos, independientemente de la cantidad de corriente conducida. Por lo tanto, la tensión entre puntos comunes, debería ser (prácticamente) cero.

Saber que los puntos eléctricamente comunes tienen una caída de tensión cero entre ellos es útil para la resolución de averías. Midiendo la tensión entre puntos de un circuito que son supuestamente comunes entre sí, el resultado debería ser cero. Si el voltímetro marca una tensión considerable entre esos dos puntos, se deduce que hay un problema, por ejemplo una interrupción del circuito.

Se supone que los cables de conexión de un circuito tienen resistencia cero, a menos que se indique lo contrario.

### Resumen

- Los cables de un circuito pueden acortarse o alargarse sin que ello afecte a su funcionamiento. Lo que importa es que los componentes se conecten entre sí siguiendo la secuencia del esquema.
- Los puntos conectados por un cable, con resistencia despreciable, se consideran eléctricamente comunes.
- Los puntos eléctricamente comunes, con resistencia cero entre ellos, tendrán una tensión cero entre ellos, independientemente de la magnitud de la corriente (idealmente).
- Las lecturas de tensión o resistencia tomadas entre conjuntos de puntos eléctricamente comunes serán iguales.
- Estas reglas son validas en condiciones ideales, en las que se supone que los cables de conexión poseen una resistencia cero. En realidad no es así, pero las resistencias de los cables deben ser lo suficientemente bajas para que puedan despreciarse.

## 1.7 Soluciones

### Ejercicio 1.1-1:

A una fuente de alimentación de 3 V se conecta una resistencia de 100  $\Omega$

- a) Dibuja un esquema del circuito.
- b) Calcula la intensidad.
- c) Calcula la potencia en la resistencia.

### Ejercicio 1.1-2:

A una fuente de alimentación de 5 V se conectan tres resistencias en serie.

$R_1 = 100 \Omega$  ,

$R_2 = 200 \Omega$  ,

$R_3 = 300 \Omega$

- a) Dibuja un esquema del circuito.
- b) Calcula la intensidad.
- c) Calcula la potencia en las resistencias.

**Ejercicio 1.2-1:**

En una resistencia de  $500\ \Omega$  se mide una corriente de  $0,1\text{ A}$ .

Calcula la tensión que cae en la resistencia y la potencia disipada.

$$P = I \cdot V$$

$$V = I \cdot R = 0,1\text{ A} \cdot 500\ \Omega = 50\text{ V} \rightarrow P = I^2 \cdot R = (0,1)^2 \cdot 500\ \Omega = 5\text{ W}$$

**Ejercicio 1.2-2:**

En una resistencia de  $500\ \Omega$  cae una tensión de  $20\text{ V}$ .

Calcula la corriente que circula por la resistencia y la potencia disipada.

$$P = I \cdot V$$

$$I = \frac{V}{R} = 20 \frac{\text{V}}{500\ \Omega} = 0,04\text{ A} \rightarrow P = V \cdot I = \frac{(20\text{ V})^2}{500\ \Omega} = 0,8\text{ W}$$

**Ejercicio 1.4-1**

Calcula la resistencia de un conductor de aluminio de 5 m de largo y  $2\text{ mm}^2$  de sección.



Estos apuntes son una adaptación de “Lessons in electric circuits volume 1 DC” , del autor Tony R. Kuphaldt.

Traducción y adaptación Paulino Posada

Traducción realizada con la versión gratuita del traductor [www.DeepL.com/Translator](http://www.DeepL.com/Translator)