

Fuente de fuerza electromotriz

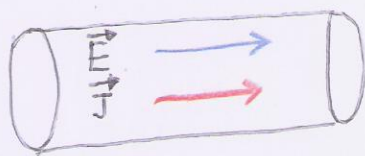
15

fuerza electromotriz = f.e.m

✓ Una corriente eléctrica puede mantenerse en una trayectoria de conducción cerrada (circuito eléctrico) "alimentada" por una Fuente de f.e.m.

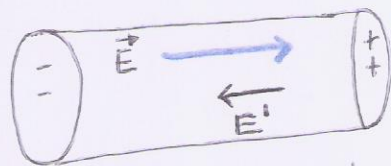
✓ Si en un tiempo inicial $t=0$ dentro de un conductor hubiese un campo eléctrico (sin estar el conductor en un circuito eléctrico),

$t=0$



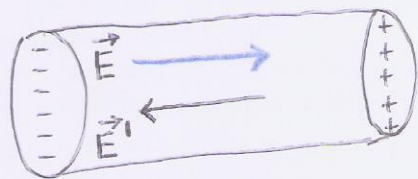
en un tiempo posterior $t=t_1$ se acumularían cargas positivas en el extremo derecho del conductor y negativas en el extremo izquierdo.

$t=t_1 > 0$



✓ Las cargas inducidas producirían un campo eléctrico $\vec{E}'$ que se opondría al campo eléctrico original.

✓ Se llegaría a un punto en este proceso en el que la cantidad de cargas acumuladas (inducidas) crearían un campo eléctrico $\vec{E}'$ de igual magnitud al de $\vec{E}$.

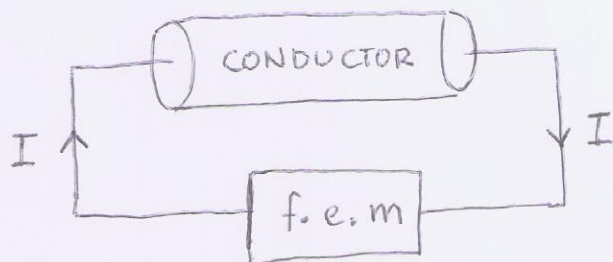


En este caso, el campo eléctrico total en el conductor

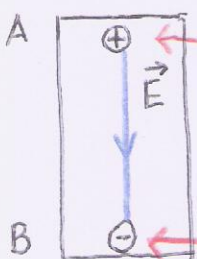
$$\vec{E}_{\text{TOTAL}} = \vec{E} + \vec{E}' = 0 \Rightarrow \text{cesa el movimiento de cargas hacia}$$

los extremos del conductor $\Rightarrow$ Cesa la corriente eléctrica dentro del conductor

Para que en el conductor haya una corriente eléctrica permanente se usa una fuente de f.e.m. (Ej. batería).



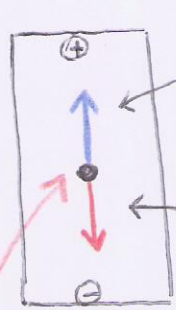
$V_A > V_B \Rightarrow$ Existe un $\vec{E}$ dirigido de A a B



polo positivo o terminal positivo de la fuente cuyo potencial eléctrico es V_A

polo negativo o terminal negativo de la fuente cuyo potencial eléctrico es V_B

✓ La fuente de f.e.m. tiene un mecanismo que le permite llevar una carga positiva infinitesimal dq del terminal negativo al terminal positivo, esto es, del punto B al punto A "en contra" de la fuerza que ejerce el campo eléctrico $\vec{E}$ sobre la carga dq .



$\vec{F}_{NC}$ = fuerza no conservativa que ejerce un mecanismo interno de la fuente sobre la carga dq

$\vec{F}_E$ = fuerza (conservativa) que ejerce el campo eléctrico $\vec{E}$ sobre la carga dq

$$\vec{F}_E = dq \vec{E} \quad (1)$$

carga positiva dq llendo de B a A

Ya que el trabajo que realiza $\vec{F}_{NC}$ contrarresta el que realiza $\vec{F}_E$ (dW_{BA})

$$\Rightarrow dW_{NC} + dW_{BA} = 0 \quad (2)$$

$$dW_{NC} = -dW_{BA} \quad (3)$$

(17)

✓ Como sabemos por lo estudiado en el Cap. 23 del libro de texto (Sears-Zemansky, Vol. 2, Ed. 4), el trabajo infinitesimal que realiza el campo eléctrico sobre la carga eléctrica infinitesimal dq , por ser conservativo, cumple con

$$dW_{BA} = -dU = -dq(V_A - V_B) = dq(V_B - V_A) \quad (4)$$

✓ Se define la f.e.m. $\mathcal{E}$ de la fuente como:

$$\mathcal{E} = \frac{dW_{NC}}{dq} \quad (5) \quad ; \text{ unidades } \Rightarrow [\mathcal{E}] = \frac{1 \text{ J}}{\text{C}} = 1 \text{ V}$$

Es importante recalcar que la f.e.m. no es una fuerza a pesar de su nombre.

La f.e.m., según la ec. (5), representa trabajo no conservativo (NC) por unidad de carga. Las unidades de la f.e.m. son Joules por Coulombios (J/C) y eso es voltios (V).

$$✓ \text{ Usando (3) y (4) } \Rightarrow dW_{NC} = dq(V_A - V_B) \quad (6)$$

$$✓ \text{ Usando (5) y (6) } \Rightarrow \mathcal{E} = V_A - V_B \quad (7)$$

La ecuación (7) se cumple para una fuente de f.e.m. ideal. Una fuente de f.e.m. ideal es una fuente de f.e.m. que no tiene resistencia interna. Veremos esto con más detalle luego.

$$(7) \Rightarrow \mathcal{E} = \underbrace{V_A - V_B}_{(8)}$$

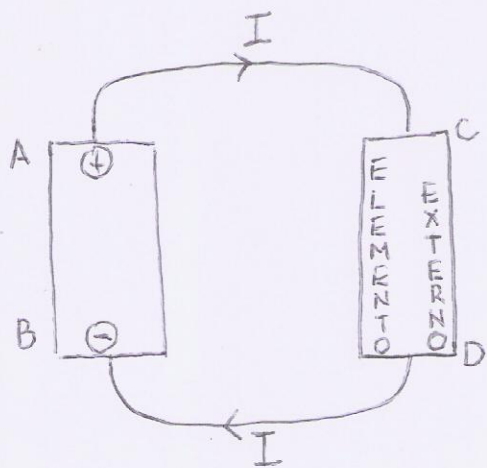
f.e.m.

Trabajo no conservativo
(realizado por la fuente)
por unidad de carga

diferencia de potencial eléctrico
entre el punto A y el punto B

Trabajo conservativo
(realizado por el campo
eléctrico $\vec{E}$)
por unidad de carga.

Fuente de f.e.m. ideal conectada a un elemento externo (resistor)



$$V_A = V_C \quad (9)$$

$$V_B = V_D \quad (10)$$

$$\Rightarrow V_A - V_B = V_C - V_D \quad (11)$$

$$V_C > V_D \quad (12)$$

$\Rightarrow$ existe un $\vec{E}$ dirigido de C a D.

$\Rightarrow$ existe una corriente eléctrica I que atraviesa el elemento externo y que se mantiene a lo largo del circuito.

Cuando la carga dq pasa de B a A, experimenta un aumento de energía potencial eléctrica de $U_B = dq V_B$ a $U_A = dq V_A$. Cuando una carga dq equivalente pasa de C a D, experimenta una disminución de energía potencial eléctrica de $U_C = dq V_C$ a $U_D = dq V_D$.

✓ Como $V_C = V_A$ y $V_D = V_B$, la disminución de energía potencial en el elemento externo ($V_D - V_C < 0$) "cancela" el aumento de energía potencial en la fuente de f.e.m. ($V_A - V_B$), de modo que el cambio efectivo de la energía potencial V en una vuelta en el circuito es cero $\Rightarrow \Delta V = 0$ (13).

✓ Si el elemento externo es un conductor de resistencia R entonces

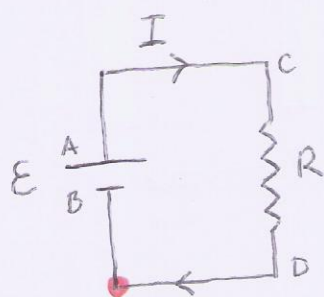
$$V_C - V_D = V_{CD} = IR \quad (14)$$

Usando (8), (11) y (14):

$$\mathcal{E} = V_A - V_B = V_C - V_D = IR \quad (15)$$

$$\Rightarrow \mathcal{E} = IR \quad (16) \quad \text{o} \quad I = \frac{\mathcal{E}}{R} \quad (16')$$

✓ Visualizamos el circuito ahora de la siguiente forma:



En esta figura se ha reemplazado la fuente de f.e.m. ideal por una batería ideal. El símbolo de una batería ideal es borne positivo / borne negativo.

En la figura también se observa el símbolo de un resistor (conducta con resistencia R), esto es,

Partiendo del punto rojo y "moviéndonos" en el sentido horario, primero ocurre un aumento de potencial eléctrico $V_A - V_B$ que es igual a $\mathcal{E}$ (Ver ecuación (8), pag. (18)) y luego, al atravesar el resistor R de C a D ocurre una disminución de potencial eléctrico

$V_D - V_C = -IR$ que cancela el aumento que ocurrió en la batería.

(20)

En una ecuación esto se escribe:

$$+ \mathcal{E} - IR = 0 \quad (17)$$

Esta ecuación es equivalente a la ec. (16) obtenida anteriormente en la página (19).

Consideraciones energéticas del circuito batería (o fuente de f.e.m.) ideal + resistor R

Multiplicando (17) por dq :

$$\mathcal{E} dq - IR dq = 0 \quad (18)$$

Sustituyendo (5) en (18):

$$dW_{nc} - IR dq = 0 \quad (19)$$

$$\Rightarrow \frac{dW_{nc}}{dt} - IR \frac{dq}{dt} = 0 \quad (20)$$

Recordando que $I = \frac{dq}{dt} \quad (21)$

$$\Rightarrow \frac{dW_{nc}}{dt} - I^2 R = 0 \quad (22)$$

Trabajo por unidad de tiempo realizado por la fuente de f.e.m. sobre una carga dq

Energía cedida por unidad de tiempo por la fuente

Potencia (en vatios) cedida por la fuente
 $[P] = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ vatio} = 1 \text{ W}$

Energía eléctrica convertida en calor por unidad de tiempo en el resistor

Potencia consumida en el resistor por el Efecto Joule.

La ecuación (22) también se puede escribir:

$$\frac{\varepsilon dq}{dt} - I^2 R = 0$$

$$\Rightarrow \varepsilon I - I^2 R = 0 \quad (23)$$

$$P_E = \varepsilon I \quad (24)$$

Potencia cedida
por la fuente

$$P_R = -I^2 R \quad (25)$$

Potencia consumida en forma de
calor en el resistor R

La energía cedida por la fuente de f.e.m. en un lapso de tiempo desde $t=t_0$ hasta $t=t_f$ puede ser determinada si se conoce P_E usando:

$$E_E = \int_{t_0}^{t_f} P_E dt \quad (26),$$

mientras que la energía convertida en calor en el resistor entre $t=t_0$ y $t=t_f$ es

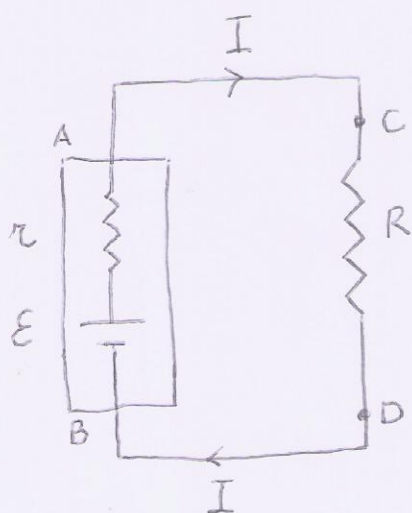
$$E_R = \int_{t_0}^{t_f} I^2 R dt \quad (27).$$

Fuente de f.e.m. real (o batería real)

(22)

La diferencia entre una fuente de f.e.m. real y una ideal es que en la real se "consume" energía en forma de calor pues dicha fuente tiene una resistencia "interna" r .

Visualizamos el circuito de la siguiente forma:



Analogamente a lo que se hizo en la ecuación (23), pag. (21),

$$\mathcal{E}I - I^2 r - I^2 R = 0 \quad (28)$$

donde al igual que antes

$P_{\mathcal{E}} = \mathcal{E}I$ es la potencia (en vatios) cedida por la batería (o la fuente)

y $P_R = I^2 R$ es la potencia consumida en forma de calor en el resistor R . Ahora se añade $P_r = I^2 r$ que representa la potencia (energía por unidad de tiempo; Joul/s) consumida en forma de calor internamente en la batería.

De esta forma, $\mathcal{E}I - I^2 r =$ Potencia "efectiva" cedida por la batería al resistor R colocado entre los puntos C y D.

La ecuación (28) $\Rightarrow \mathcal{E}I - I^2 r = I^2 R = P_R \quad (29)$

Potencia de salida de una fuente

(ver pag. 963, Sears-Zemansky, Vol. 2, Ed. 11)

✓ El elemento externo al que se conecta la fuente, en lugar de ser un resistor, puede ser cualquier otro elemento o dispositivo o un conjunto de elementos.

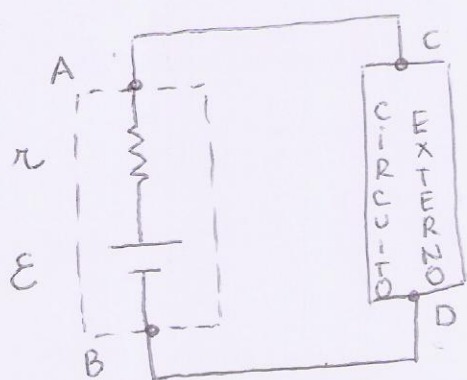
✓ Resulta entonces más general escribir la ecuación (29) como :

$$\mathcal{E}I - I^2 r = I^2 R = (IR)I = V_{CD} I \quad (30)$$

⇒ La potencia cedida por la fuente (real) al circuito externo sería

$$P = V_{CD} I \quad (31)$$

siendo V_{CD} la diferencia de potencial eléctrico entre los extremos del circuito externo.



P lógicamente es la potencia consumida en el circuito externo.

Si el circuito externo es un solo resistor de resistencia R , entonces, como $V_{CD} = IR$ (32),

se puede escribir para un resistor

$$P = V_{CD} I = I^2 R = \frac{V_{CD}^2}{R} \quad (33)$$

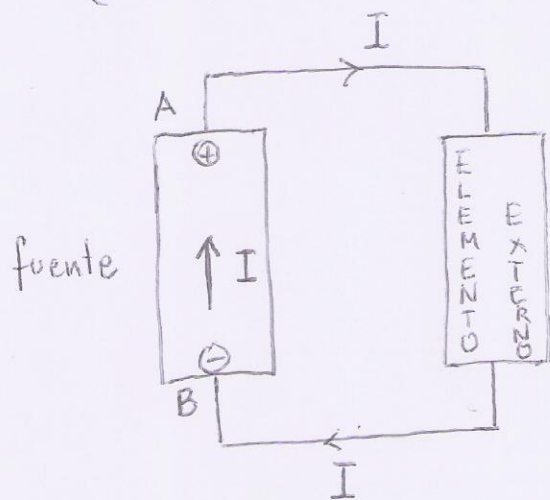
✓ Además, como $V_{AB} = V_{CD}$, P se puede escribir también como

$$P = I V_{AB} \quad (34)$$

donde V_{AB} es la diferencia de potencial eléctrico o voltaje entre los extremos de la fuente o batería (entre los bornes de la batería).

✓ Hay que decir que I representa la corriente eléctrica que pasa por la fuente.

✓ Es importante darse cuenta que cuando la corriente I va del borne negativo al positivo, esto es, de un punto de menor potencial eléctrico (V_B) a un punto de mayor potencial eléctrico (V_A) , como se muestra en la figura,



la fuente cede energía. Esto quiere decir que dentro de la batería (por ejemplo) se convierte energía química en eléctrica que se da a la carga dq que va del terminal $\ominus$ al terminal $\oplus$.

• Si la fuente de f.e.m. fuese lo que se conoce como un "generador de corriente" (lo estudiaremos en el capítulo 27, Sears-Zemansky, Vol. 2, Ed. II), entonces se convierte energía magnética en eléctrica que se suministra a la carga dq en su paso del terminal $\ominus$ al $\oplus$.

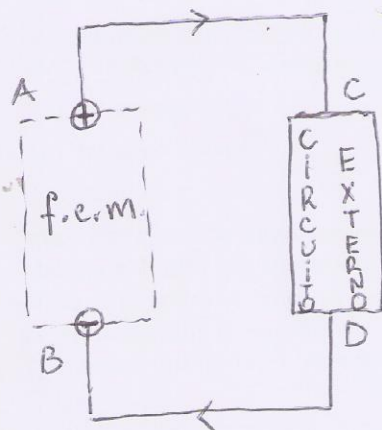
- En un acelerador Tandem Van De Graaf se convierte energía mecánica en eléctrica.

(Ver Fig. 22.28, pag. 857, Sears-Zemansky, Vol. 2, Ed. 11)

- ✓ Por otro lado, cuando la corriente I pasa del terminal $\oplus$ al $\ominus$, lo que ocurre es que se convierte energía eléctrica en química, esto es, "se carga la batería".

En este caso, la batería (o la fuente de f.e.m.) no cede energía al circuito externo sino que el circuito externo le cede energía a la batería pague se está convirtiendo energía eléctrica en energía química dentro de la batería.

- ✓ En el caso en que la fuente de f.e.m. (batería) cede energía al circuito externo, la potencia cedida por la fuente al circuito externo es



$$P = IV \quad (35)$$

donde I es la corriente que pasa por el circuito externo y V es la diferencia de potencial

eléctrico o voltaje entre los extremos C y D del

circuito externo que es igual a la diferencia (26)
de potencial eléctrico o voltaje entre los
extremos A y B de la fuente.

Ver pag. (23)*

Si la fuente es real, $V = \mathcal{E} - Ir$ (36),

donde $\mathcal{E}$ es la f.e.m de la fuente,

I es la corriente eléctrica que pasa a
través de ella (del terminal $\ominus$ al $\oplus$) y

r es la resistencia interna de la fuente.

Si el circuito externo es un solo resistor de
resistencia R , entonces la potencia mostrada
en la ecuación (35) también puede ser escrita
como

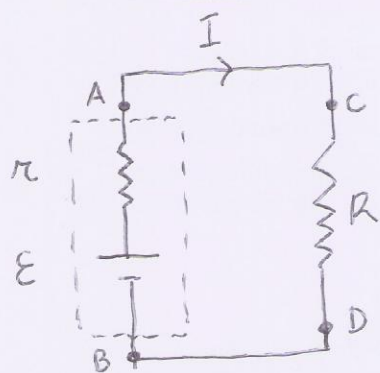
$$P = IV = I^2 R = \frac{V^2}{R} \quad (36) \quad [P] = \frac{1J}{s} = 1 \text{ vatio} = 1 W$$

Dada la potencia P , podemos calcular la
energía suministrada al circuito externo entre
un tiempo t_0 y un tiempo t_f usando

$$\text{Energía} = \int_{t_0}^{t_f} P(t) dt \quad (37) \quad [\text{Energy}] = \text{Joul.}$$

Ésta también representa la energía cedida por
la fuente entre el tiempo t_0 y el tiempo t_f .

Corriente eléctrica en el circuito de la pag. (22)



$$(28) \Rightarrow \mathcal{E}I - I^2r - I^2R = 0$$

Dividiendo esta ecuación por I

$$\mathcal{E} - Ir - IR = 0 \quad (38)$$

Si nos movemos en sentido horario comenzando en el punto B del circuito, primero pasamos a través de la f.e.m. de la batería del terminal $\ominus$ al $\oplus$. Esto representa un aumento de potencial eléctrico igual al primer término $\mathcal{E}$ al lado izquierdo de la ecuación (38). Si seguimos moviéndonos a lo largo de la resistencia interna r de la batería y notamos que la corriente I va en la misma dirección que nuestro movimiento, esto indica que al pasar a través de r , el potencial eléctrico disminuye. Esta disminución de potencial eléctrico es el término $-Ir$ de la ecuación (38). Finalmente, para volver (en sentido horario) al punto B, hay que atravesar el resistor R en el mismo sentido de la corriente lo cual representa una disminución de potencial eléctrico $-IR$, como se muestra en la ecuación (38). La suma de todas las diferencias de potencial eléctrico o voltajes a lo largo del circuito (considerando sus signos) es igual a cero (ver ecuación (38)) por conservación de energía.

A partir de la ecuación (38), podemos obtener la corriente eléctrica I que circula por el circuito:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{r + R} \quad (39).$$

- ✓ I es mayor cuando la fuente de f.e.m. o batería es ideal, esto es, cuando $r = 0$.
- ✓ Una fuente f.e.m. no genera la misma corriente siempre porque depende de la resistencia R del circuito externo al que se conecte.
- ✓ Una fuente de f.e.m. es una fuente que produce una fuerza electromotriz (f.e.m.) constante mientras la fuente conserve sus características internas constantes.
- ✓ Después de un tiempo, las características internas de la fuente (electrolito en caso de baterías, pilas) se degradan y eso conduce a la reducción de la f.e.m. $\mathcal{E}$.

Símbolos para diagramas de circuitos

29

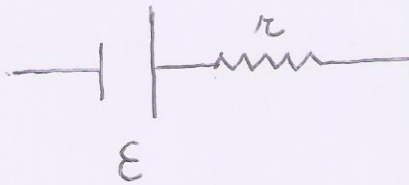


Resistor



Fuente de f.e.m. ideal

ϵ potencial eléctrico mayor
potencial eléctrico menor



Fuente de f.e.m. real
 r = resistencia interna



Voltímetro (mide la diferencia de potencial eléctrico o voltaje entre los extremos de un elemento de un circuito al que se conecta en paralelo; tiene resistencia infinita)

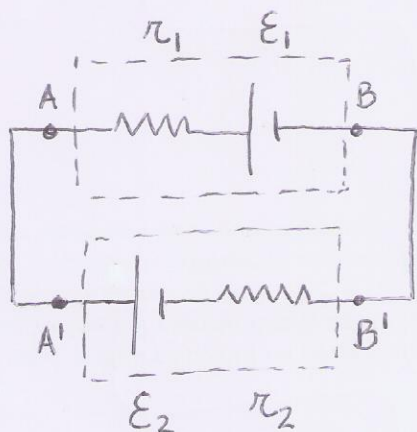


Amperímetro (mide la corriente eléctrica que circula por él; se conecta en serie con el elemento del circuito cuya corriente eléctrica se quiere determinar; tiene resistencia cero)

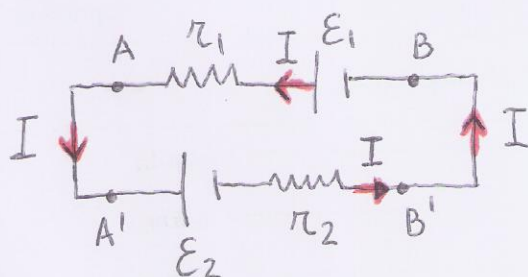
- ✓ Se recomienda leer y hacer los ejemplos 25.5, 25.6, 25.7 y 25.8 (Sears-Zemansky, pag. 958-960, Vol. 2, Ed. II) Mostrar a los estudiantes estos ejemplos si el tiempo lo permite.
- ✓ Analizar y comprender la figura 25.20, pag. 961 del Sears-Zemansky. Mostrar a los estudiantes si el tiempo lo permite.

Potencia de salida y Potencia de entrada de una fuente
(Ver pag. 963, Sears-Zemansky, Vol. 2, Ed. II)

Supongamos que tenemos el siguiente circuito, siendo $\mathcal{E}_1 > \mathcal{E}_2$



Podemos dibujar el circuito de la siguiente forma con la corriente eléctrica I en sentido anti-horario porque la batería superior tiene una f.e.m $\mathcal{E}_1$ mayor que la de la batería inferior $\mathcal{E}_2$.



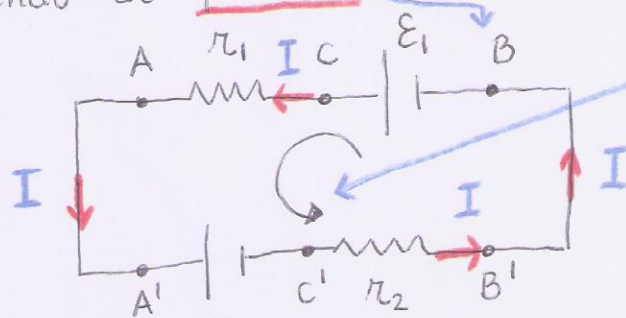
Regla de Kirchhoff (Cap. 26 Sears-Zemansky)

La suma algebraica de las diferencias de potencial eléctrico o voltajes en un lazo, espira o circuito (trayectoria cerrada) es CERO.

1 (Ver pag. 986, Sección 26.2, (Sears-Zemansky, Vol. 2, Ed. II))

Partiendo del punto B en sentido anti-horario

(31)



$$V_{CB} + V_{AC} + V_{C'A'} + V_{B'C'} = 0 \quad (39)$$

$$\Rightarrow \mathcal{E}_1 - I r_1 - \mathcal{E}_2 - I r_2 = 0 \quad (40)$$

$$\Rightarrow \mathcal{E}_1 - I r_1 = \mathcal{E}_2 + I r_2$$

$$\mathcal{E}_1 I - I^2 r_1 = \mathcal{E}_2 I + I^2 r_2 \quad (41)$$

energía química convertida en eléctrica por unidad de tiempo

energía eléctrica convertida en química por unidad de tiempo

energía eléctrica convertida en calor por unidad de tiempo (efecto Joule)

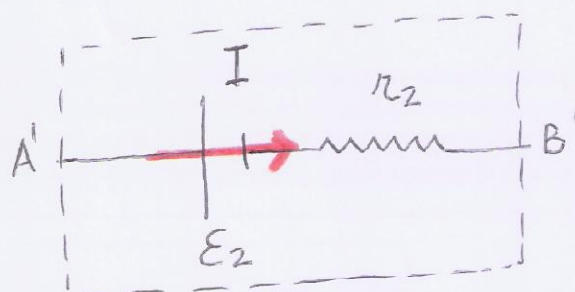
energía eléctrica convertida en calor por unidad de tiempo (efecto Joule)

$P_{\mathcal{E}_2}$ = Potencia de entrada a la fuente 2

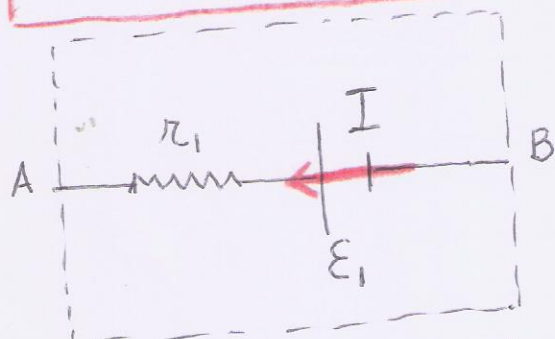
$$P_{\mathcal{E}_2} = \mathcal{E}_2 I + I^2 r_2 \quad (43)$$

$P_{\mathcal{E}_1}$ = Potencia de salida de la fuente 1

$$P_{\mathcal{E}_1} = \mathcal{E}_1 I - I^2 r_1 \quad (42)$$



I va del terminal de mayor potencial al de menor potencial.



I va del terminal de menor potencial al terminal de mayor potencial.