

6-17. Fuerza electromotriz Thomson.—Una explicación completa de la teoría de las fuerzas electromotrices térmicas sobrepasa los fines de esta obra. Todo lo que puede intentarse es hacer que resulte razonable la existencia de tales efectos. Supongamos que una varilla conductora es sostenida por aisladores y que un extremo de la misma se calienta como indica la figura 6-7(a), de modo que se establezca un gradiente de temperaturas a lo largo de la barra. Si imaginamos los electrones libres de la varilla como análogos a un gas, puede esperarse que la mayor temperatura de un extremo ocasionará un aumento de presión y una difusión de gas electrónico desde el extremo calentado. La acumulación de carga negativa en el extremo más frío crearía un campo eléctrico dentro de la varilla en el sentido representado por el vector E_0 , y la difusión cesaría cuando la fuerza sobre los electrones, debida a este campo, tuviera un valor suficiente para compensar su tendencia a difun-

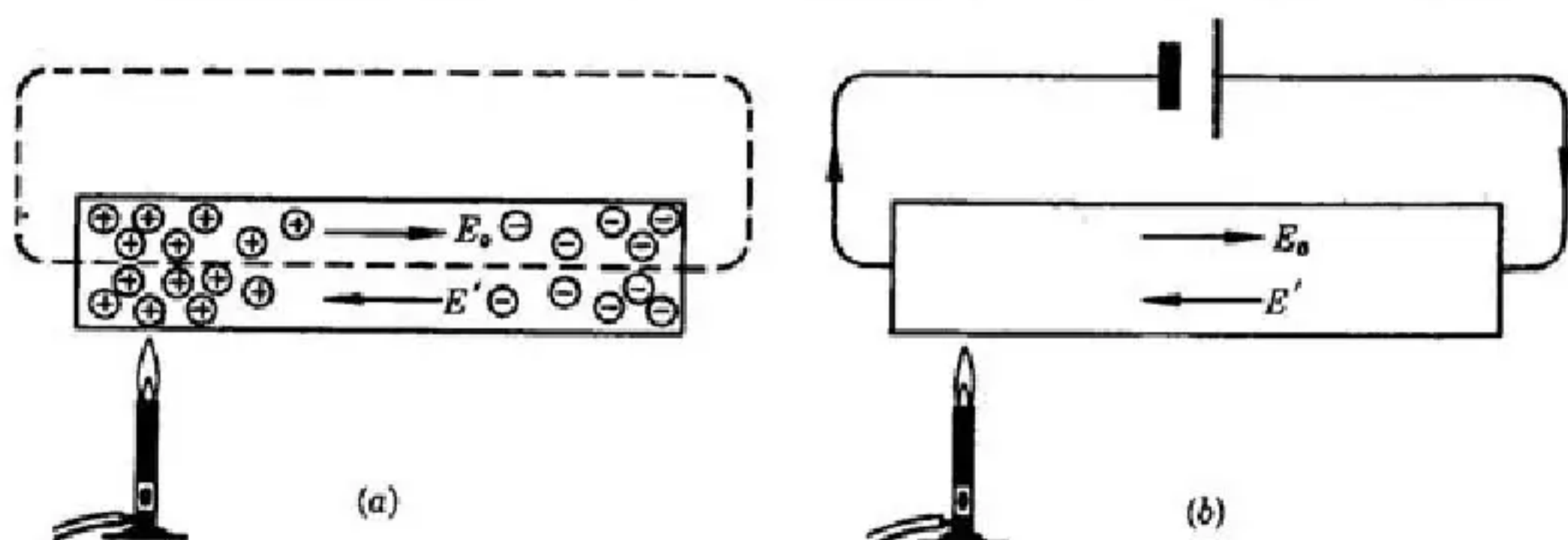


FIG. 6-7.—Efecto Thomson.

dirse a causa de la diferencia de temperatura. Es un hecho experimental que se crea un campo eléctrico en una varilla conductora cuando existe una diferencia de temperatura entre sus extremos, pero la naturaleza insatisfactoria de la teoría esquematizada anteriormente se evidencia al descubrir que en algunos conductores el campo eléctrico está dirigido desde el extremo caliente al frío, mientras que en otros tiene sentido opuesto.

Cuando se ha alcanzado en la varilla el estado estacionario los electrones de su interior están en equilibrio. El campo electrostático ejerce una fuerza sobre los electrones en un sentido, y podemos considerar que la diferencia de temperatura origina un campo equivalente que los impulsa en sentido opuesto. Se recordará que la fem de un circuito puede definirse como la integral del campo resultante alrededor del circuito. Puesto que la integral curvilínea del campo electrostático a lo largo de una trayectoria cerrada es nula, la integral curvilínea del campo resultante a lo largo de una trayectoria cerrada tal como la de la línea de trazos de la figura 6-7(a) se reduce a la integral del campo equivalente a lo largo de la varilla, puesto que este campo equivalente sólo existe dentro

de la varilla y es nulo fuera. Representemos por E' el campo equivalente. El valor de E' en cualquier punto de la varilla depende del gradiente de temperatura dT/dl (T es la temperatura Kelvin) en el punto, y puede escribirse:

$$E' = \sigma \frac{dT}{dl} \quad [6-2]$$

El coeficiente σ , que se conoce como coeficiente de Thomson por haber sido sir William Thomson (más tarde lord Kelvin) quien primero investigó este tipo de fem, es característico del material que forma el conductor, y es función de la temperatura. La fem ϵ de la varilla es entonces

$$\begin{aligned} \epsilon &= \int E' dl \\ &= \int \sigma \frac{dT}{dl} dl \\ &= \int_{T_1}^{T_2} \sigma dT, \end{aligned} \quad [6-3]$$

donde T_1 y T_2 son las temperaturas en los extremos de la varilla. La fem se denomina *fuerza electromotriz Thomson*.

Puede demostrarse la existencia de una fem Thomson enviando una corriente a través de la varilla como indica la figura 6-7(b). Cuando la corriente y la fem tienen sentidos opuestos, la energía eléctrica se convierte en calor a razón de ϵi por segundo. Cuando la corriente tiene el mismo sentido que la fem, el calor se convierte en energía eléctrica. La cantidad de calor, Ri^2 , desarrollada por unidad de tiempo aumenta, por tanto, ligeramente en el primer caso, y disminuye también ligeramente en el segundo. Las fuerzas electromotrices Thomson no son nunca grandes, sino del orden de algunos milivoltios.

Evidentemente, una sola fem Thomson no puede ser utilizada nunca para impulsar una corriente en un circuito cerrado. Si se calienta un anillo metálico en un punto de su periferia y se enfría en otro, se producen fuerzas electromotrices iguales y opuestas en las dos trayectorias desde el punto calentado al punto enfriado. Si se utilizan diferentes metales en las dos trayectorias desde el punto caliente al punto frío, las fuerzas electromotrices Thomson no serán iguales en general, sino que, como demostraremos en la sección siguiente, se desarrollan otras fuerzas electromotrices en las soldaduras de los distintos metales.

6-18. Fuerza electromotriz Peltier.—Cuando dos conductores distintos a la misma temperatura se ponen en contacto como indica la figura 6-8(a), habrá una *difusión* de electrones del uno al otro a menos que el *gas electrónico* dentro de cada uno tenga la misma *presión*. (Esta explicación teórica, como la de la fem de Thomson, no ha de entenderse demasiado rigidamente.) La reagrupación de electrones continúa hasta que

se establece en la soldadura un campo eléctrico de intensidad suficiente para que se alcance el equilibrio. La soldadura de ambos metales se convierte entonces en un origen de fem denominada *fuerza electromotriz Peltier* en honor de Jean C. Peltier (1785-1845). La fem Peltier depende de ambos metales y de la temperatura de la soldadura entre ellos. Para dos metales A y B, a la temperatura T , escribiremos la fem Peltier en la forma:

$$(\pi_{AB})T.$$

Las fuerzas electromotrices Peltier, al igual que las Thomson, son de un orden de magnitud de algunos milivoltios. Su existencia puede demostrarse, por tanto, enviando

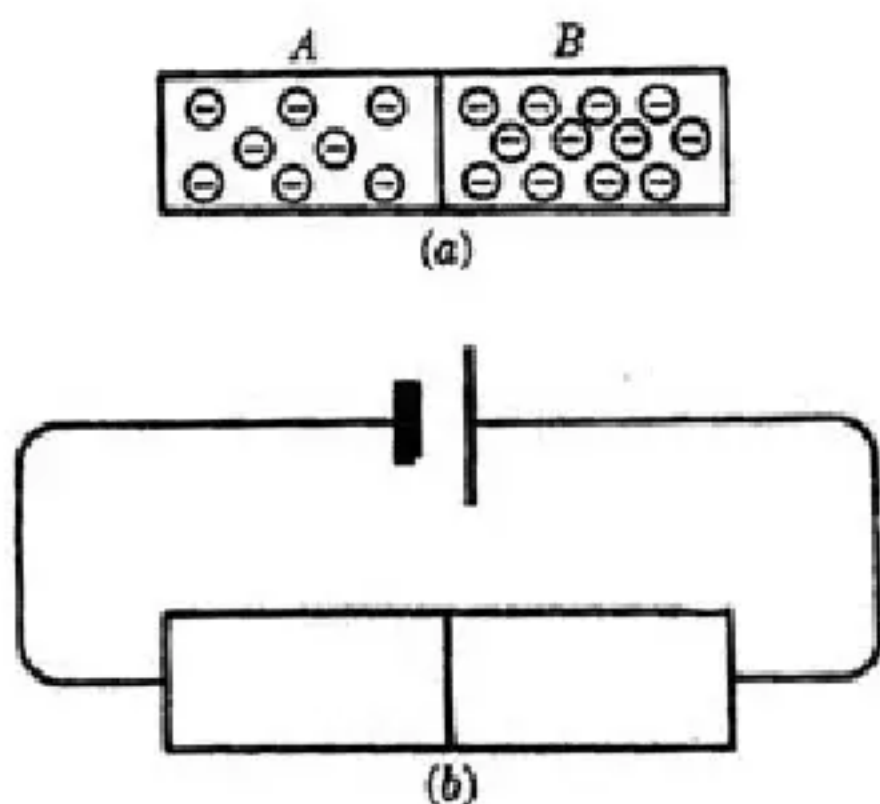


FIG. 6-8.—Efecto Peltier.

una corriente a través de la soldadura como en la figura 6-8(b), bien en su mismo sentido o en el opuesto. Con los metales antimonio y bismuto, para los cuales la fem Peltier es inusitadamente grande, no es difícil obtener enfriamiento, cuando la corriente y la fem tienen el mismo sentido, superior al calentamiento Ri^2 , lo que produce en realidad un descenso efectivo de temperatura en la soldadura.

6-19. Fuerza electromotriz Seebeck.—Consideremos a continuación un circuito cerrado formado por dos metales diferentes A y B como indica la figura 6-9. Las dos soldaduras se encuentran a las temperaturas T_1 y T_2 . Hay necesariamente un gradiente de temperatura en ambos metales, de modo que se creará una fem Thomson en cada uno. Por tanto, dado que las soldaduras están a temperaturas distintas, las fuerzas electromotrices Peltier en las soldaduras son distintas. La fem neta en el circuito es entonces la suma algebraica de las dos fuerzas electromotrices Thomson y de las dos fuerzas electromotrices Peltier. La fem neta no es, en general, nula y, por consiguiente, existirá una corriente en el circuito mientras ambas soldaduras estén a temperaturas distintas. Este fenómeno fué observado por primera vez en 1826 por Thomas J. Seebeck (1770-1831) y la fem neta

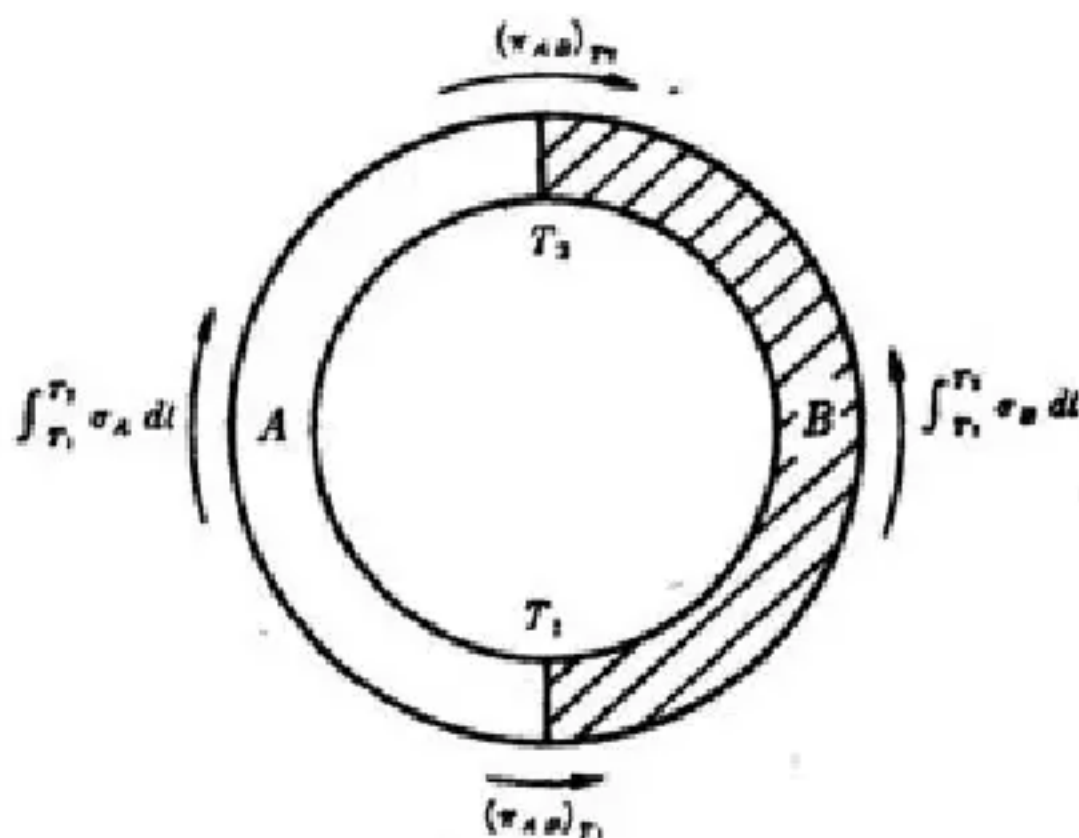


FIG. 6-9.—Efectos Peltier y Thomson en un par termoeléctrico.

se denomina fuerza electromotriz Seebeck. Si las fuerzas electromotrices individuales tienen los sentidos representados en la figura 6-9, y se considera como positivo el sentido de las agujas del reloj, la fem Seebeck es:

$$\epsilon_{AB} = (\pi_{AB})_{T_2} - (\pi_{AB})_{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} (\sigma_A - \sigma_B) dT. \quad [6-4]$$

El circuito de la figura 6-9 se denomina *par termoeléctrico*.

La fem de un par termoeléctrico no es nunca muy grande, aun con grandes diferencias de temperatura entre las soldaduras, y el efecto no constituye un procedimiento práctico de obtener directamente energía eléctrica a partir de calor. Sin embargo, los pares termoeléctricos tienen un gran valor práctico, como medio de medir temperaturas. La fem del

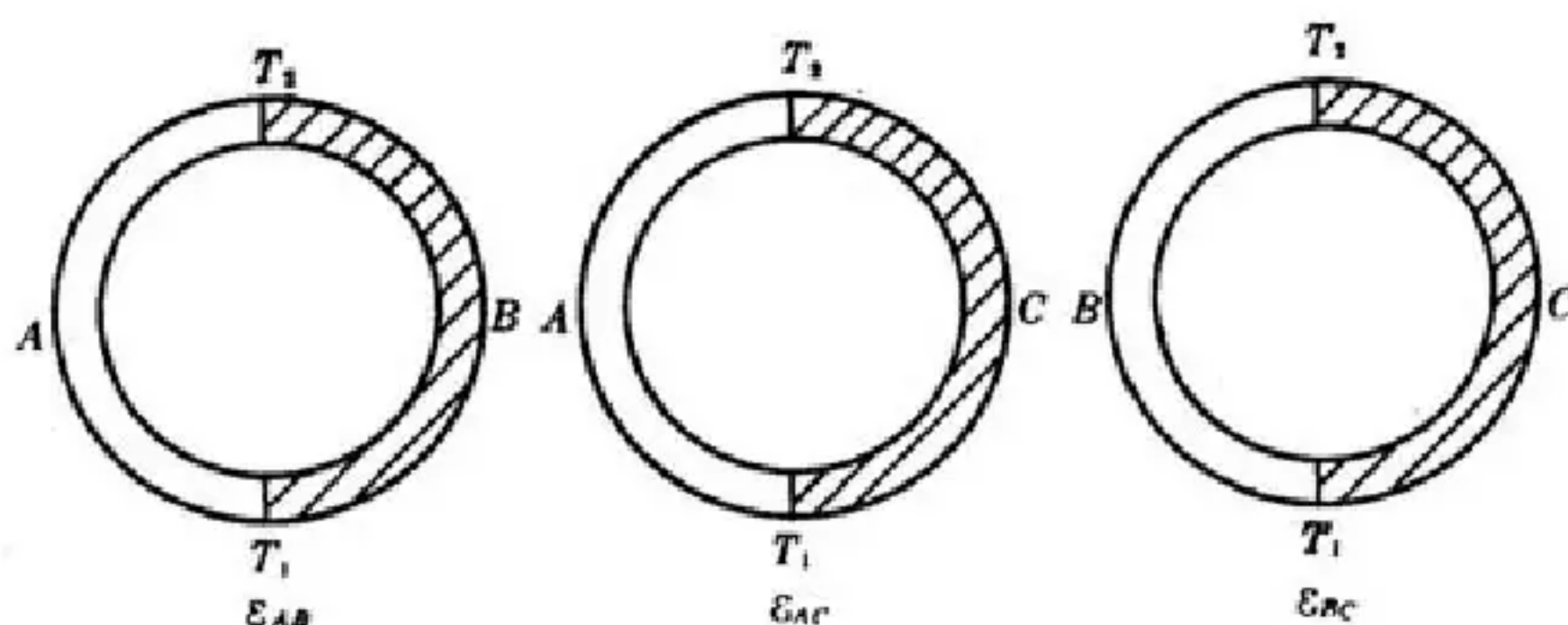


FIG. 6-10.

par depende de la temperatura de las soldaduras. Si se mide, por consiguiente, la fem manteniendo una soldadura a una temperatura conocida, puede determinarse la temperatura de la otra. El intervalo de temperatura en el cual encuentran aplicación los pares termoeléctricos se extiende desde la temperatura más baja obtenible a la del punto de fusión de los metales que forman el par.

Para dos temperaturas de soldaduras dadas, la fem de un circuito compuesto por los metales A y B (ϵ_{AB}) es igual a la diferencia entre la fem (ϵ_{AC}) de un circuito formado por los metales A y C y la fem (ϵ_{BC}) de otro formado por los metales B y C (Fig. 6-10). Esto es,

$$\epsilon_{AB} = \epsilon_{AC} - \epsilon_{BC}. \quad [6-5]$$

Por consiguiente, si se elige cierto metal de referencia C, pueden tabularse las fuerzas electromotrices de los otros respecto a este metal, determinándose por sustracción la fem de cualquier otro par. De ordinario se toma el plomo como metal de referencia.

Puede intercalarse en un circuito termoeléctrico, como el de la figura 6-11(a), un *metal intermedio* D, sin modificar la fem, siempre que los extremos de D se encuentren a igual temperatura. Esto es, la fem de

tal circuito es la misma que la de otro formado solamente por los metales A y B con sus soldaduras a las temperaturas T_1 y T_2 .

El circuito del par termoeléctrico ordinario, representado en la figura 6-11(b), utiliza este hecho. Los metales A y B pudieran ser el níquel y el hierro, conectados por hilos de cobre a un galvanómetro G que ocupa una posición adecuada. Una soldadura se encuentra a la temperatura T_2

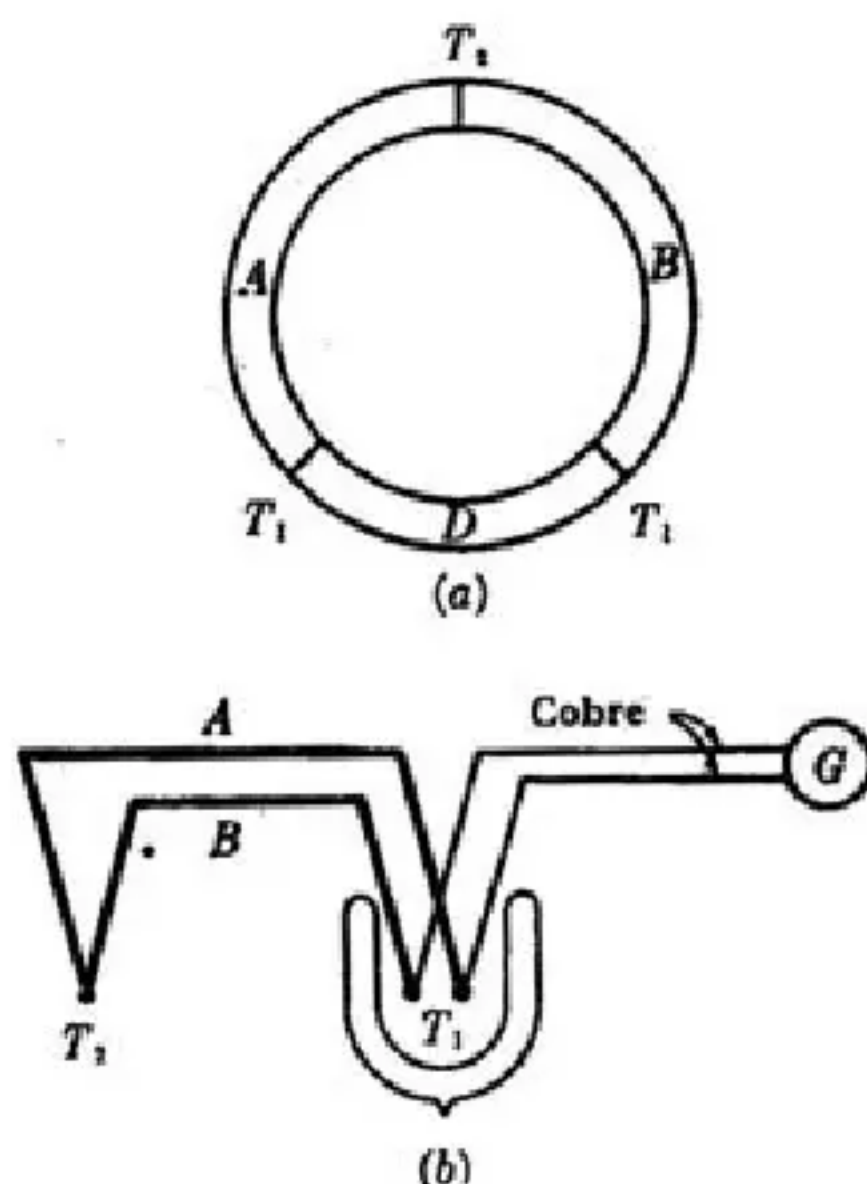


FIG. 6-11.—Interposición de un metal intermedio en un par termoeléctrico.

electromotrices Peltier, puede calcularse mediante la Ec. [6-4] la fem neta de un par termoeléctrico. En la práctica se mide ordinariamente la fem en un intervalo de temperaturas de las soldaduras y se expresa mediante una ecuación empírica. Las temperaturas se toman por comodidad en la escala centigrada y se representan por t . Si una de las soldaduras de un par termoeléctrico formado por los metales A y B se encuentra a la temperatura t , y la otra, a t_0 , la fem desarrollada por el par puede expresarse muy aproximadamente por la ecuación de segundo grado

$$\varepsilon_{AB} = a_{AB}(t - t_0) + \frac{1}{2}b_{AB}(t^2 - t_0^2), \quad [6-6]$$

en la que los coeficientes a_{AB} y b_{AB} son característicos de los metales A y B . (Para cálculos más precisos puede incluirse un término en t^3 .) La tabla 6-2 relaciona los valores de a y de b , respecto al plomo, para cierto número de metales y aleaciones. De la Ec. [6-5] se deduce:

$$a_{AB} = a_{A-\text{plomo}} - a_{B-\text{plomo}}; \quad b_{AB} = b_{A-\text{plomo}} - b_{B-\text{plomo}}.$$

a medir, y la otra a la temperatura T_1 , que puede mantenerse fija fundiendo hielo en un vaso Dewar. La fem es la de un par níquel-hierro con sus soldaduras a las temperaturas T_2 y T_1 .

La fem de un par termoeléctrico suele medirse, como indica la figura 6-11 (b), intercalando un galvanómetro o un voltímetro en un punto adecuado. Tal instrumento sólo indica, naturalmente, la diferencia de potencial entre sus propios bornes, que es menor que la fem del par en el valor de la caída ir en el circuito. Por consiguiente, debe utilizarse un instrumento de resistencia elevada o, lo que es preferible, un potenciómetro.

6-20. Variación de la fem con la temperatura.—Si se conoce cómo varían con la temperatura los coeficientes Thomson y las fuerzas

La figura 6-12 representa una gráfica de ε en función de t , para a_{AB} y b_{AB} positivos, manteniendo t_0 constante; resulta evidentemente una parábola. Sin razón que lo justifique, a la derivada, $d\varepsilon/dt$, de la fem respecto de la temperatura se la llama corrientemente *potencia termoeléctrica* del par. La temperatura t_n para la cual $d\varepsilon/dt = 0$, se denomina *temperatura neutra*. Según la Ec. [6-6], si t_0 es constante,

$$\frac{d\varepsilon_{AB}}{dt} = a_{AB} + b_{AB}t,$$

y como

$$d\varepsilon/dt = 0 \text{ para } t = t_n,$$

$$t_n = -\frac{a_{AB}}{b_{AB}}$$

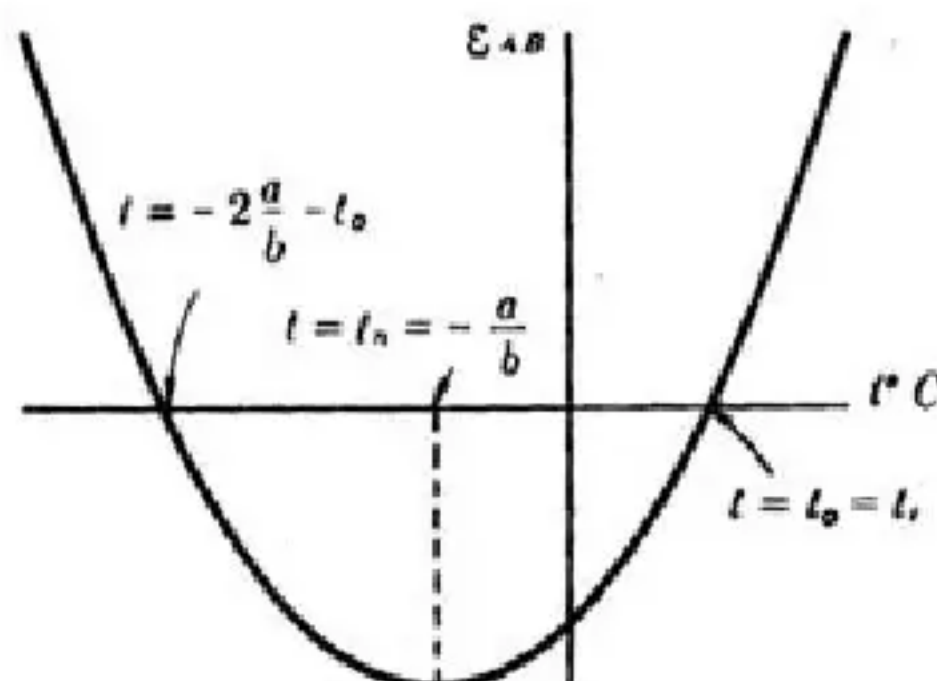


FIG. 6-12.—Fem en función de la temperatura t de la soldadura caliente cuando se mantiene la soldadura fría a la temperatura t_0 .

TABLA 6-2

Coefficientes termoeléctricos

Metal de referencia, plomo. ε_{AB} en microvoltios. Cuando ε_{AB} es positiva, el sentido (convencional) de la corriente es, en la soldadura caliente, del metal A al B.

SUSTANCIA	a	b
Antimonio	+35,6	+0,145
Bismuto	-74,4	+0,032
Constantán (60 % Cu, 40 % Ni)	-38,1	+0,0888
Cobre	+ 2,71	+0,0079
Hierro	+16,7	-0,0297
Níquel	-19,1	-3,02
Platino	- 3,03	-3,25

NOTA: Estas cifras deben utilizarse con reservas. Pequeñas cantidades de impurezas, o variaciones en el tratamiento térmico, tienen un efecto muy pronunciado sobre los coeficientes termoeléctricos, y los valores dados sólo deben tomarse como típicos.

La fem es nula a las temperaturas

$$t = t_0 \text{ y } t = -\frac{2a_{AB}}{b_{AB}} - t_0,$$

que son las dos raíces de la Ec. [6-6] cuando $\varepsilon_{AB} = 0$. La segunda de estas temperaturas se denomina *temperatura de inversión*, t_i .

Para la mayor parte de los metales o de las aleaciones corrientemente utilizadas en los circuitos de los pares termoeléctricos, el intervalo de

funcionamiento está suficientemente alejado del punto neutro, y la relación entre la fem y la temperatura de la soldadura caliente resulta aproximadamente lineal si se mantiene constante la temperatura de la soldadura fría.

EJEMPLO.—Una de las soldaduras de un par termoelectrico hierro-cobre se mantiene a 0° C. Calcúlese la temperatura neutra, la temperatura de inversión y la fem cuando la otra soldadura se encuentra a 200° C. Consideremos el hierro como metal *A* y el cobre como metal *B*.

En virtud de la tabla 6-2,

$$a_{\text{hierro-plomo}} = 16,7, \quad b_{\text{hierro-plomo}} = -0,0297,$$

$$a_{\text{cobre-plomo}} = 2,71, \quad b_{\text{cobre-plomo}} = 0,0079.$$

Por tanto,

$$a_{\text{hierro-cobre}} = 16,7 - 2,71 = 14,0,$$

$$b_{\text{hierro-cobre}} = -0,0297 - 0,0079 = -0,0376.$$

La temperatura neutra es

$$t_n = -\frac{a}{b} = -\frac{14,0}{-0,0376} = 372^\circ \text{C},$$

y la temperatura de inversión,

$$t_i = -\frac{2a}{b} = 744^\circ \text{C}.$$

La expresión general de la fem es

$$\varepsilon_{AB} = 14,0 (t - t_0) - \frac{1}{2} \times 0,0376 (t^2 - t_0^2),$$

y para $t = 200^\circ \text{C}$, $t_0 = 0^\circ \text{C}$,

$$\begin{aligned} \varepsilon_{AB} &= 14,0 \times 200 - \frac{1}{2} \times 0,0376 \times (200)^2 \\ &= 2050 \mu\text{V} = 2,05 \text{ mV}. \end{aligned}$$

Puesto que ε_{AB} es positiva, el sentido (convencional) de la corriente es, en la soldadura caliente, del hierro (metal *A*) al cobre (metal *B*).

Un razonamiento teórico basado en el segundo principio de termodinámica demuestra que las fuerzas electromotrices Seebeck, Peltier y Thomson están relacionadas mediante las siguientes ecuaciones:

$$(\pi_{AB})_T = T \frac{d\varepsilon_{AB}}{dT}, \quad [6-7]$$

$$(\sigma_A - \sigma_B) = -T \frac{d^2\varepsilon_{AB}}{dT^2} \quad [6-8]$$

EJEMPLO.—Calcúlese las fuerzas electromotrices Peltier y Thomson de un par termoelectrico hierro-cobre cuyas soldaduras se encuentran a 200° C y 0° C.

En función de las temperaturas centígradas, la Ec. [6-7] se convierte en

$$\begin{aligned}(\pi_{AB})_t &= (t + 273) \left(\frac{d\varepsilon_{AB}}{dt} \right) \\ &= (t + 273) (\alpha_{AB} + b_{AB}t).\end{aligned}$$

Por tanto, utilizando los valores de α_{AB} y b_{AB} del ejemplo anterior, se obtienen para las fuerzas electromotrices Peltier en las soldaduras:

$$(\pi_{\text{hierro-cobre}})_{100^\circ \text{C}} = 473 \times (14,0 - 0,0376 \times 200) = 3070 \mu\text{V},$$

$$(\pi_{\text{hierro-cobre}})_{0^\circ \text{C}} = 273 \times 14,0 = 3820 \mu\text{V}.$$

La fem Thomson puede calcularse como sigue: puesto que

$$\frac{d^2\varepsilon}{dT^2} = \frac{d^2\varepsilon}{dt^2} = \frac{d}{dt} (\alpha + bt) = b,$$

tenemos:

$$\begin{aligned}\text{fem Thomson} &= \int_{T_1}^{T_2} (\sigma_A - \sigma_B) dT = \int_{T_1}^{T_2} -T \frac{d^2\varepsilon}{dT^2} dT \\ &= \int_{T_1}^{T_2} -bT dT = -\frac{b}{2} (T_1^2 - T_2^2) \\ &= -\frac{0,0376}{2} (273^2 - 473^2) \\ &= 2800 \mu\text{V}.\end{aligned}$$

La fem neta o fem Seebeck es, por tanto,

$$\varepsilon = 3070 - 3820 + 2800 = 2050 \mu\text{V},$$

que coincide con el resultado del ejemplo anterior.

PROBLEMAS

6-1. Se hace referencia al ejemplo de la sección 6-20. *a)* Calcúlese la fem de un par termoeléctrico hierro-cobre cuando se mantiene una soldadura a 0°C , y la otra, a las temperaturas siguientes: -200°C , 0°C , 372°C , 744°C , 1000°C . *b)* Repítanse los cálculos para el caso en que una soldadura se mantiene a 200°C . *c)* Constrúyanse gráficas correspondientes a las respuestas de las partes *a)* y *b)*. ¿Podría realmente utilizarse la soldadura para medir una temperatura de 1000°C ?

6-2. Una soldadura de un par termoeléctrico cobre-constantán se encuentra a 20°C y la otra a 300°C . *a)* Calcúlese la fem. *b)* ¿Es igual la fem si una soldadura se encuentra a 120°C y la otra a 400°C ?

6-3. Calcúlese la fem de un par termoeléctrico bismuto-antimonio cuando una soldadura se encuentra a 0°C , y la otra, a 100°C . Compárese con la fem de un par hierro-cobre cuyas soldaduras estén a las mismas temperaturas.

6-4. *a)* Calcúlese la fem Peltier en una soldadura antimonio-bismuto a la temperatura de 20°C . *b)* Si se envía una corriente de 20 A a través de la soldadura, hállese la cantidad de energía térmica transformada en energía eléctrica por unidad de tiempo, o viceversa. *c)* ¿Cuál debería ser el sentido de la corriente en la soldadura para producir un efecto de enfriamiento?