

TERMOPARES

Termopar. Es un mecanismo de medida de temperatura que esta construido por dos alambres de material diferente A y B conectados a un circuito que aparece en la Fig.2.1, unidos en una junta termoeléctrica llamada junta de medición T_1 y cerrado el circuito en otra junta llamada de referencia T_2 , un voltímetro de resistencia infinita detecta una fuerza electromotriz¹ “E”, ó si se conecta a un amperímetro, se mide una corriente “I”. La magnitud del voltaje “E” depende de los materiales y de las temperaturas T_1 y T_2 . La corriente “I” es simplemente “E” dividido por la resistencia total del circuito², incluyendo la resistencia del amperímetro. Si se permite que pase la corriente, se genera una potencia eléctrica; que viene de una corriente de calor de los alrededores de los alambres. Así se obtiene la conversión directa de energía térmica en energía eléctrica. El efecto es reversible, de manera que obligando a pasar una corriente de un fuente exterior a través de un circuito termoeléctrico produciría una corriente de calor hacia y del circuito.

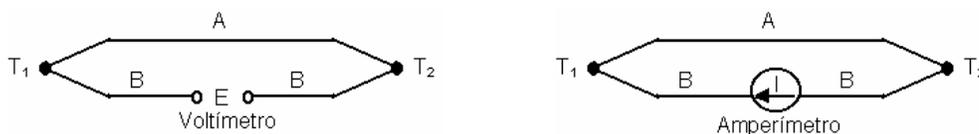


Fig. 2.1

¹ Fem

² Ley de Ohm

En la práctica, la junta de medición es la junta del termopar que está sometida a la temperatura que se quiere medir y la junta de referencia es la unión que está a temperatura conocida o cuya temperatura es automáticamente compensada y normalmente es transferida al instrumento por medio del cable de extensión.

La relación entre el voltaje “E” y la temperatura T_1 y T_2 , que es la base de la medida termoeléctrica de la temperatura, se llama efecto Seebeck. En 1821, Seebeck observó que cuando fundía un alambre de cobre a uno de hierro y calentaba el extremo fundido, obtenía una fuerza electromotriz (fem). También descubrió que fluía una corriente del cobre al hierro en el extremo o terminal calentado. Esta fue la primera observación de la que se tiene conocimiento del fenómeno de la corriente termoeléctrica. Los descubrimientos posteriores revelaron que el flujo de corriente observado por Seebeck se debía, aparentemente, a dos causas independientes. Cada una de ellas recibió el nombre de los científicos que las descubrieron. Hoy en día, estas dos fuentes de fem se conocen como *efecto Peltier* y *efecto Thomson*.

EFECTO PELTIER

Siempre que se someta a temperaturas fluctuantes a la unión de un termopar se producirán cambios en el valor de la fem (mili voltaje) generado que es dependiente únicamente, de la temperatura en la junta de medición T_1 , pero no existe ninguna garantía de que lo haga en modo uniforme.

EFECTO THOMSON

Existe un potencial en un alambre de material homogéneo cuando uno de los extremos está a una temperatura mayor que el otro. La teoría que se utiliza para explicar este fenómeno no concuerda exactamente con todos los efectos experimentales observados.

Otras leyes termoeléctricas relacionadas con el funcionamiento del termopar son la ley de las temperaturas intermedias y la ley de los metales intermedios.

LEY DE LAS TEMPERATURAS INTERMEDIAS

La suma de la fem de un termopar con su junta fría a 0°C y su junta caliente a una temperatura T , más la fem de un termopar con su junta fría a la temperatura T y su junta caliente a la temperatura de medición, es igual a la fem de un termopar con su junta fría a 0°C y su junta caliente a la temperatura de medición.

LEY DE LOS METALES INTERMEDIOS

Cuando la junta caliente y el instrumento están distantes es necesario introducir cables de extensión de otra naturaleza que el termopar, esto aparentemente provocaría alteraciones en la respuesta. Esta ley nos indica que el valor de la fem se mantendrá constante, siempre que el tercer metal no este sujeto al efecto Thomson, es decir, que la temperatura a lo largo de él se mantenga constante.

La fuerza electromotriz (fem) producida está formada en su totalidad por una parte debido al efecto Peltier, que se localiza en cada unión, y por otra (usualmente mucho menor), causada por el efecto Thomson, que se distribuye a lo largo de cada conductor entre las uniones. Se supone que la fem del efecto Peltier son proporcionales a la temperatura de la unión, mientras que la fem por efecto Thomson son proporcionales a la diferencia entre los cuadrados de las temperaturas de las uniones. Para el voltaje total, la ecuación toma la forma de :

$$E = C_1(T_1 - T_2) + C_2(T_1^2 - T_2^2) \quad . \quad . \quad . \quad (2.1)$$

en donde: E = Fem del termopar en mili Volts.

T = Temperaturas de la unión en grados Kelvin.

C_1 y C_2 = Constantes que dependen del tipo de metal o aleación.

Desafortunadamente, las suposiciones que se hicieron en el análisis mediante el cual se dedujo la ecuación (2.1), no se satisface con exactitud en la practica, por lo tanto, no pueden usarse comúnmente para predecir con precisión las temperaturas de los voltajes medidos; más bien, los materiales para los pares termoeléctricos deben calibrarse dentro del intervalo completo de temperatura en el que se va a usar. En esta calibración solo interesa el voltaje total, y las contribuciones separadas de los efectos Peltier y Thomson no se determinan. Por tanto, la medida de temperatura por medios termoeléctricos se basa en calibraciones “empíricas” y en la aplicación de las llamadas “leyes” termoeléctricas cuya validez ha demostrado la experiencia. Estas leyes que se dan enseguida, son adecuadas para el análisis de la mayor parte de los circuitos prácticos de los

termopares. En estos casos, donde la configuración del circuito no conduce por sí misma a la aplicación directa de estas leyes, existen otros procedimientos que pueden emplearse como alternativas.

LEYES DE LOS COMPORTAMIENTOS DE LOS TERMOPARES

Las leyes de comportamiento de los termopares pueden enunciarse en la Fig. 2.2:

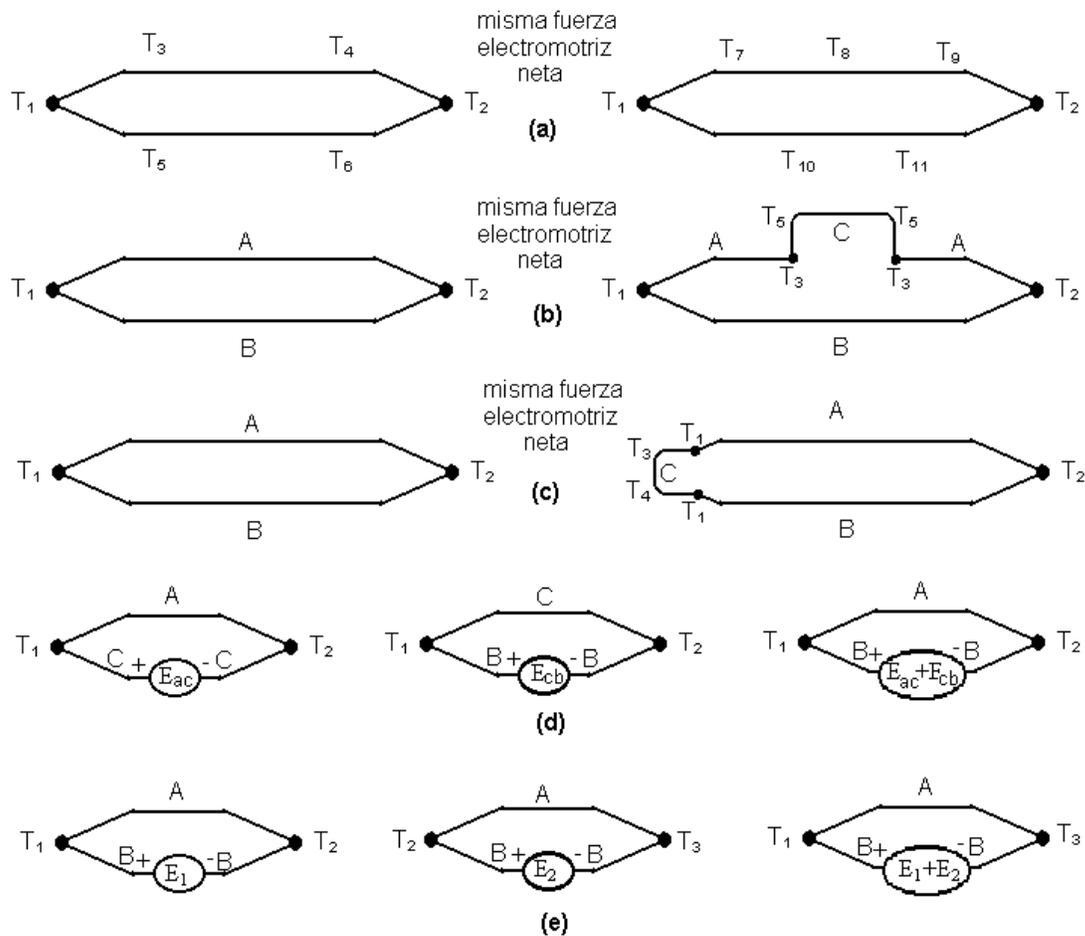


Fig. 2.2

- (a) La fem de un termopar con uniones T_1 y T_2 resulta totalmente inafectada por la temperatura en todo el circuito si los dos metales que se usan son homogéneos.
- (b) Si se inserta un tercer metal homogéneo C en A y B, mientras las dos uniones termoelectricas nuevas estén a temperaturas iguales, la fem neta del circuito permanece invariable, cualquiera que sea la temperatura de C fuera de las uniones.
- (c) Si se inserta C entre A y B en una de las uniones, la temperatura de C en cualquier punto fuera de las uniones AC y AB están ambas a la temperatura T_1 , la fem neta es la misma que si C no estuviera allí.
- (d) Si las fem's de los metales A y C es E_{AC} y la de los metales B y C es E_{BC} , la fem térmica de los metales A y B es $E_{AC} + E_{CB}$.
- (e) Si un termopar produce la fem E_1 cuando sus uniones están a T_1 y T_2 y E_2 cuando están a T_2 y T_3 , producción $E_1 + E_2$ cuando las uniones estén en T_1 y T_3 .

Estas leyes son de gran importancia en la aplicación práctica de los termopares. La ley (a) dice que los alambres que conectan las dos uniones pueden exponerse con seguridad a una temperatura desconocida y variable sin afectar el voltaje producido. La ley (b) y (c) permiten insertar un aparato para medir voltaje dentro del circuito, en realidad para medir la fem más bien que para hablar de su existencia. Es decir, el metal C representa el circuito interno (usualmente todo el cobre en los instrumentos precisos) entre los bornes de presión de un mili

voltímetro o un potenciómetro. El instrumento puede conectarse de dos maneras, como se muestra en la Fig. 2.2(b) y (c). La ley (c) demuestra también que las uniones del termopar pueden soldarse (introduciendo un tercer metal) sin afectar las lecturas. La ley (d) demuestra que todos los pares posibles de metales no es necesario calibrarlos, ya que cada uno de los metales individuales pueden usarse en pares con un patrón (se usa platino) y se calibra, más adelante profundizaremos en este tema. La ley (e) como podemos notar, nos estamos refiriendo a la ley de las temperaturas intermedias.

UNIÓN DE LOS TERMOPARES

Existen dos tipos de uniones de los termopares; una consiste en presionar los dos metales entre sí [Fig.2.3(a)] y la otra une los metales mediante soldadura [Fig.2.3(b)], estos dos tipos de uniones dan voltajes idénticos. Si se deja pasar corriente, las corrientes que pasan pueden ser diferentes, ya que la resistencia del contacto difiere con los diferentes métodos de unión. La unión que más se usa es la de soldadura (ya sea la de gas o la eléctrica), aunque en los pares de cobre y constantán³ se usa tanto la soldadura de plata como la soldadura blanda (con bajas temperaturas solamente).

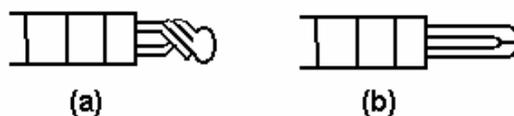


Fig. 2.3

³ Termopar tipo “T”

MATERIALES DE LOS TERMOPARES

En aplicaciones industriales, la elección de los materiales empleados para fabricar un termopar depende del rango de temperatura que se va a medir, del tipo de atmósfera a la que estará expuesto el material y de la precisión requerida en la medición.

El material de los termopares se debe seleccionar por su buena resistencia a las atmósferas corrosivas y oxidantes y el rango de temperatura que se va a usar, por su resistencia al cambio de características que afecten su calibración, por estar libres de corrientes parásitas y por permitir la consistencia en las lecturas dentro de los límites de precisión requeridos.

TIPOS DE TERMOPARES

Los termopares están clasificados por tipos de calibración ya que difieren en sus curvas de F_{em} vs. temperatura. Algunos generan considerablemente más voltaje a menor temperatura, mientras que otros no comienzan a desarrollar un voltaje significativo hasta que están sometidos a altas temperaturas. Adicionalmente, los tipos de termopar tienen diferentes tipos de compatibilidad con las diferentes atmósferas. La reacción química entre ciertas aleaciones de los termopares y la aplicación en la atmósfera podría causar degradación metalúrgica.

Los tipos de termopar normalmente usados en aplicaciones industriales, se identifican con una letra originalmente asignada por la Instrument Society of America (I.S.A.) y nuevamente adoptada como Estándar por el ANSI-MC96.1-1975.

Los tipos de termopar se muestran en la Tabla 2.1. Adicionalmente, hay algunos tipos de termopares que no están considerados en la simbología de la ANSI, esos tipos de termopar están constituidos por aleaciones de tungsteno y tungsteno-renio. Generalmente para utilizarlos en la medida de altas temperaturas, estos son una alternativa económica en comparación al basado en platino y sus respectivas aleaciones, pero se limita al uso en atmósferas no oxidantes e inertes.

Tipo de termopar	Composición química	Rango de aplicación usual (°C)	Notas
B	Platino 30% Rodio (+) Platino 6% Rodio (-)	1370 a 1700	Fácilmente contaminado, requiere protección.
C*	Tungsteno 5% Renio (+) Tungsteno 26% Renio (-)	1650 a 2315	Sin resistencia a la oxidación. Vacío, hidrógeno ó atmósferas inertes.
E**	Cromel (+) Constantán (-)	95 a 900	No someterlo a la corrosión en temperaturas criogénicas ⁴ .
J	Hierro (+) Constantán (-)	95 a 760	Recomendado en atmósferas reductoras. El cable de fierro se somete a la oxidación en altas temperaturas - Usar un calibre grueso para compensar.
K**	Cromel (+) Alumel (-)	95 a 1260	Satisface en atmósferas oxidantes.
N	Nicrosil (+) Nisil (-)	650 a 1260	Para uso general, mejor resistencia a la oxidación y al sulfuro que el tipo "K".
R	Platino 13% Rodio (+) Platino (-)	870 a 1450	Recomendado en atmósferas oxidantes. Fácil de contaminarse, requiere protección.
S	Platino 10% Rodio (+) Platino (-)	980 a 1450	Patrón de laboratorio, altamente reproducible. Fácil de contaminarse, requiere protección.
T**	Cobre (+) Constantán (-)	-200 a 350	El más estable en rangos de temperatura criogénica. Excelente en atmósferas reductoras y oxidantes dentro del rango de temperatura.

* Sin símbolo ANSI.

** También conveniente para aplicaciones criogénicas de -200 a 0° C.

TABLA 2.1

⁴ Temperatura Criogénica: temperatura muy cercana al cero absoluto, este es igual a -273.16° C.

Tipo "E".

El termopar tipo "E" es adecuado para usarse a temperaturas de hasta 900° C (1650° F) en atmósferas reductoras medio oxidantes, inertes y al vacío. En temperaturas criogénicas el termopar no está sujeto a la corrosión. Este termopar tiene la fem más grande por grado de todos los termopares usados comúnmente.

Tipo "J".

El termopar tipo "J" puede ser usado expuesto o aislado, donde haya una deficiencia de oxígeno libre. Para una larga vida y limpieza de este, se recomienda usar un tubo protector. Ya que el alambre de hierro (JP) se oxidará rápidamente sobre temperaturas de 540° C (1000° F), es recomendado usar un alambre de calibre grueso para compensar. La máxima temperatura de operación recomendada es de 760° C (1400° F).

Tipo "K".

De acuerdo a su confiabilidad y su precisión, el termopar tipo "K" es usado extensamente en temperaturas de hasta 1260° C (2300° F). Es bueno proteger este tipo de termopar con un adecuado tubo protector de metal ó cerámica, especialmente en atmósferas reductoras. En atmósferas oxidantes, así como un horno eléctrico, el tubo protector no es siempre necesario cuando otras condiciones son adecuadas, este es necesario solamente para la limpieza del termopar y protección mecánica en general.

Tipo "N"

Este termopar basado en aleación de níquel es usado principalmente en altas temperaturas de hasta 1260° C (2300° F). El termopar tipo N en comparación con el tipo K puede proveer una mejor resistencia a la oxidación en altas temperaturas y una vida más amplia en donde el sulfuro este presente.

Tipo "T"

Este termopar puede ser usado tanto en atmósferas oxidantes como reductoras, sin embargo para una larga vida se recomienda utilizar un tubo protector. Ya que por su estabilidad en bajas temperaturas, es un termopar superior para una amplia variedad de aplicaciones en temperaturas bajas y criogénicas.

Tipo "R", "S" y "B"

La temperatura máxima de operación recomendada para los tipos R y S es de 1450° C (2640° F); El tipo B se recomienda para usarse hasta 1700° C (3100° F). Este tipo de termopar es muy fácil de contaminarse. Particularmente las atmósferas reductoras dañan a este tipo de termopares. Los termopares de metales nobles deben siempre estar protegidos.

Tipo "C"

Este termopar de metal refractario puede ser usado hasta temperaturas de hasta 2315° C (3100° F). Debido a que no tiene ninguna resistencia a la oxidación, su uso es restringido al vacío, hidrógeno y a atmósferas inertes.

Las relaciones temperatura – Fem. de cada uno de estos tipos de termopares, están reportadas en la tabla del Instituto Americano de Estándares, ANSI MC96.1-1975. Para darnos una idea de los valores, estos son indicados en forma grafica en la siguiente figura:

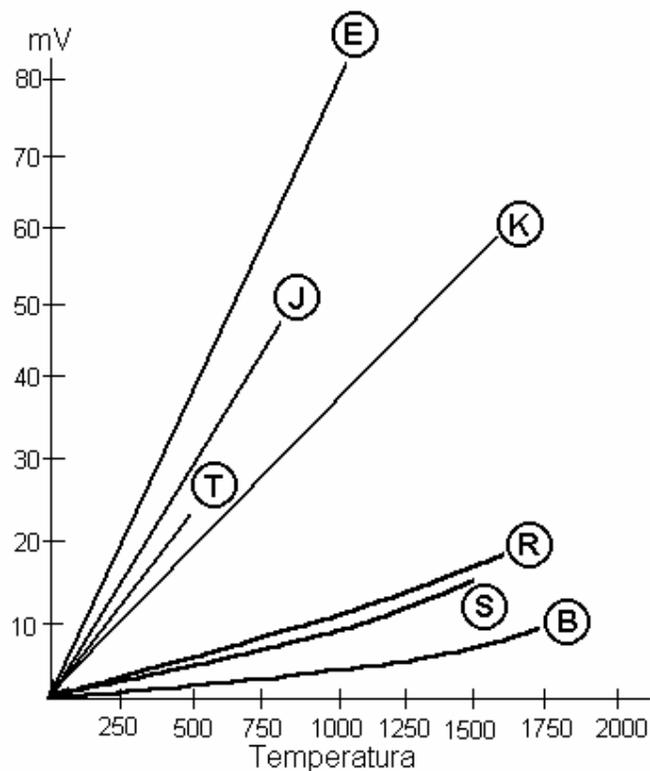


Fig. 2.4

LIMITES MÁXIMOS DE TEMPERATURA

La tabla 2.2 que se muestra a continuación nos da los límites superiores de temperatura de varios elementos con sus respectivos calibres de alambres. Estos límites se aplican para elementos protegidos. Estos datos no aplican para los elementos termopar en blindajes metálicos, aisladas con material compactado (Aeropak). En operaciones reales, puede haber instancias donde los límites de

temperatura recomendados puedan ser excedidos. Igualmente existen aplicaciones donde no será obtenida satisfactoriamente la vida de los elementos en los límites de temperatura recomendados. De cualquier modo, en general, los límites de temperatura listados son como proveer la vida de los elementos satisfactoriamente cuando los alambres son operados en esa temperatura continuamente.

TERMOPAR TIPO	CALIBRES AWG = (mm)				
	8 = 3.25	14 = 1.63	20 = 0.81	24 = 0.51	28 = 0.33
T	***	370° C	260° C	200° C	150° C
J	760° C	590° C	480° C	370° C	320° C
E	860° C	650° C	540° C	430° C	430° C
K	1260° C	1090° C	980° C	870° C	760° C
R	***	***	***	1480° C	***
S	***	***	***	1480° C	***
B	***	***	***	1700° C	***
N	1260° C	1090° C	980° C	870° C	760° C

Tabla 2.2

LIMITES DE ERROR DE LOS TERMOPARES

Sobre los valores nominales de temperatura y Fem, reportados por las tablas, se admite una tolerancia o sea un límite de error que es la máxima desviación permisible en grados centígrados de los valores estándar de temperatura-Fem para el tipo de termopar en cuestión, cuando la temperatura de la junta de referencia es 0° C y la junta de medición está a la temperatura que se quiere medir. La tabla 2.3 muestra estos límites de error según la norma ANSI MC96.-1975.

TERMOPAR TIPO	TEMPERATURA °C	LIMITES DE ERROR	
		GRADO ESTANDAR *	GRADO ESPECIAL *
T	0 a 350	±1.0° C o ±0.75%	±0.5° C o ±0.4%
J	0 a 760	±2.2° C o ±0.75%	±1.1° C o ±0.4%
E	0 a 900	±1.7° C o ±0.5%	±1.0° C o ±0.4%
K	0 a 1250	±2.2° C o ±0.75%	±1.1° C o ±0.4%
R	0 a 1450	±1.5° C o ±0.25%	±0.6° C o ±0.1%
S	0 a 1450	±1.5° C o ±0.25%	±0.6° C o ±0.1%
B	870 a 1700	±0.5%	***
N	0 a 1250	±2.2° C o ±0.75%	±1.1° C o ±0.4%
T	-200 a 0	±1.0° C o ±1.50%	±0.5° C o ±0.8%
E	-200 a 0	±1.7° C o ±1.0%	±1.0° C o ±0.5%
K	-200 a 0	±2.2° C o ±2.0%	***

Tabla 2.3

CONEXIÓN DE TERMOPARES EN SERIE O PARALELO

Varios termopares se pueden conectar juntos, en serie o en paralelo, a fin de obtener funciones útiles. La conexión en serie con todas las juntas de medición a una temperatura y las juntas de referencia a otras se usan principalmente como medio para aumentar la sensibilidad (Fig.2.5).

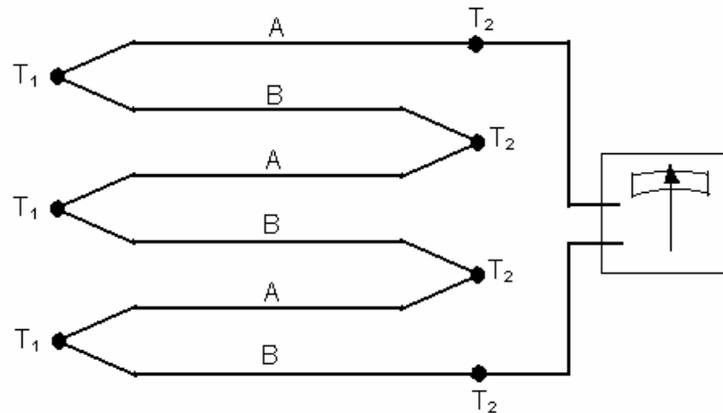


Fig.2.5

A este arreglo se le llama pila termoeléctrica y la salida de n termopares es n veces mayor que la de un solo par. En este tipo de conexiones la fem total desarrollada es la suma de la de los termopares individuales usados. La resistencia total es la suma de las resistencias individuales. Esto se expresa algebraicamente como lo muestran las ecuaciones 2.2 Y 2.3.

$$E_m = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n \quad . \quad . \quad . \quad (2.2)$$

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad . \quad . \quad . \quad (2.3)$$

en donde: E_m = Diferencia de potencial en el mili voltímetro.

$E_{1,2,3,\dots,n}$ = Potencial desarrollado por cada termopar usado.

R_T = Resistencia total.

$R_{1,2,3,\dots,n}$ = Resistencia de cada termopar usado.

La temperatura promedio del sistema o el proceso se encuentra dividiendo la fem total (E_m) entre el número de termopares utilizados (n). Este arreglo proporciona más sensibilidad, pero puede ser menos preciso debido a la incertidumbre que hay por falta de homogeneidad de los termopares.

Los termopares múltiples, conectados en paralelo (Fig.2.6) se deben conectar directamente a las dos terminales comunes en que se mide la fem neta.

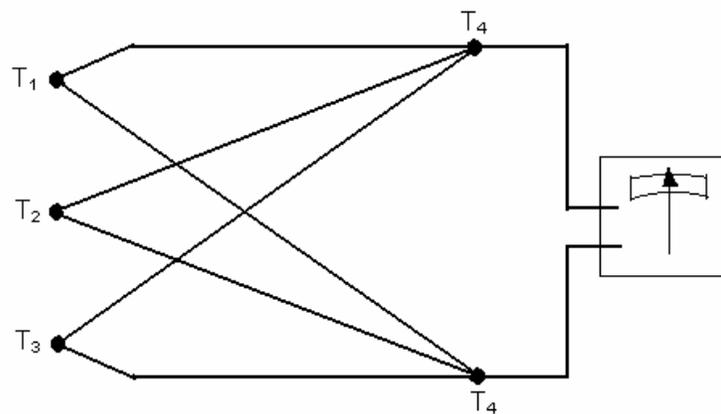


Fig.2.6

Este arreglo mide la fem promedio, se manera que debe tenerse cuidado de mantener a los termopares tan parecidos como los permita la medición. En un arreglo en paralelo, las resistencias del medidor indicador y la de la línea afectan la lectura o la indicación del potencial, como lo muestra la ecuación 2.4

$$E_m = \left(\frac{e_1}{r_1} + \frac{e_2}{r_2} + \frac{e_3}{r_3} + \dots + \frac{e_n}{r_n} \right) \left[\frac{R_m}{1 + (R_m + R_l)(1/r_1 + 1/r_2 + 1/r_3 + \dots + 1/r_n)} \right] \quad (2.4)$$

en donde: E_m = Diferencia de potencial en el medidor indicador.

R_m = Resistencia del medidor indicador.

R_l = Resistencia de la línea del circuito.

$r_{1,2,3,\dots,n}$ = Resistencia de las unidades independientes.

$E_{1,2,3,\dots,n}$ = Potencial generado por cada unidad.

Se debe establecer una unión de referencia tanto en el arreglo en serie como en el de paralelo con el objeto de obtener mediciones de temperaturas exactas.

La aplicación más común del arreglo en serie es en los pirómetros de radiación total, mientras que en el arreglo en paralelo se usaba en lugares donde se requería que la temperatura fuera homogénea (ejemplo cámaras humidificadoras).