



c. 2

MEMORANDUM FOR THE DIRECTOR
FROM THE ASSISTANT ATTORNEY GENERAL
RE: [Illegible]

CONFIDENTIAL

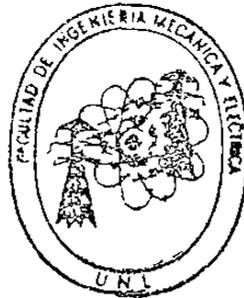
TM
Z585
M2
FINE
1979
C4



1020070555

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE
NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES



DIRECCION GENERAL DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

MEDICION DE TEMPERATURA
CON TERMOPARES

TRABAJO QUE PRESENTA

GUADALUPE EVARISTO CEDILLO GARZA

EN OPCION AL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE ING. MECANICA

MONTERREY, N. L.

DICIEMBRE DE 1979

TM
Z5853
.M2
FIME
1979
C4
ej. 2



MEDICION DE TEMPERATURA CON TERMOPARES

- 1.- INTRODUCCION
- 2.- LEYES DE LOS TERMOPARES
- 3.- FORMAS Y MATERIALES MAS COMUNMENTE USADOS EN LA CONSTRUCCION DE TERMOPARES.
- 4.- SELECCION DE TERMOPARES
- 5.- CONEXION DEL TERMOPAR AL DISPOSITIVO
- 6.- CALIBRACION DEL TERMOPAR
- 7.- CONEXION DE TERMOPARES
- 8.- CONSTANTE DE TIEMPO DEL TERMOPAR
- 9.- USO DE LAS TABLAS DE VOLTAJES
- 10.- CONCLUSIONES
- 11.- BIBLIOGRAFIA

MEDICION DE TEMPERATURA CON TERMOPARES

INTRODUCCION

Una forma de medir la temperatura de un medio, es utilizar un termopar.

Un termopar se forma uniendo dos materiales de naturaleza distinta (generalmente en forma de alambre) mediante soldadura, fusión o uniéndolos a presión mediante grapas,

La unión es el elemento sensor del termopar, es decir, es la parte que se debe poner en contacto con el medio al que se va a medir la temperatura, y los extremos (piernas, brazos) son las terminales que se conectan al instrumento indicador, generalmente un potenciómetro (ver fig. no. 1).

El termopar se puede usar para medir temperaturas, desde la vecindad del cero grados absolutos, hasta los 3000°C, y según los materiales con que se construya, la forma de instalarlo en el medio a medir su temperatura, y de los instrumentos usados para medir el voltaje de los extremos del par, puede ser un dispositivo de baja, mediana o alta precisión.

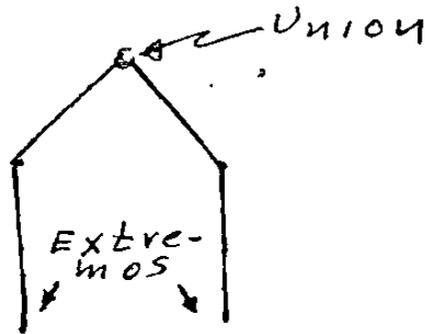


Fig. N^o 1

Este trabajo es una recopilación de algunos de los criterios que existen, para la medición de temperaturas utilizando termopares.

2.- LEYES DE LOS TERMOPARES (Efecto Seebeck)

En 1821, Thomas Johans Seebeck, reportó haber observado que - una aguja magnética se deflexionaba al estar cerca de un circuito eléctrico hecho de dos materiales diferentes (sin que hubiera, en el circuito eléctrico, ninguna fuente de energía eléctrica conocida entonces); el atribuía la deflexión a la diferencia de temperaturas que había en el circuito y no a la corriente eléctrica que fluía en él.

Cuando se unen por un extremo, dos materiales distintos, (normalmente estos materiales tienen la forma de alambre) y la unión se pone a una temperatura distinta a los extremos libres, en estos aparece un voltaje. Este fenómeno se llama efecto seebeck, y al dispositivo formado con los dos materiales, se le da el nombre de termopar (ver fig. No. 2).

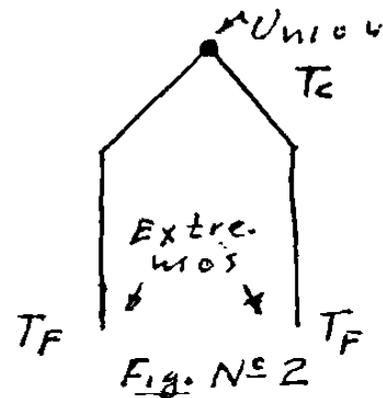
El valor de este voltaje, depende de la diferencia de temperaturas entre la unión, y los extremos libres o pies del termopar, y de los materiales usados para formarlo.

La formulación matemática de este efecto es:

$$|\Delta V| = \alpha \Delta T \quad (I)$$

$$I = 0$$

$$T \rightarrow 0$$



En donde:

I = Corriente eléctrica que circula por el termopar

V = Voltaje en los extremos del termopar (abiertos)

ΔT = Diferencia de temperatura entre la unión y los extremos del termopar.

α = Coeficiente Seebeck (potencia termoeléctrica, sensibilidad, etc.)

El coeficiente seebeck, puede tener signo positivo o negativo, y su valor numérico varía de un material a otro, para un material dado, el coeficiente seebeck es función de la temperatura.

EL CIRCUITO DEL TERMOPAR

Si a un termopar formado con los materiales A y B, cuyos coeficientes seebeck son α_A y α_B respectivamente, se le adicionan terminales de otro material "C", (como se muestra en la figura No. 3), cuyo coeficiente seebeck sea α_C , el voltaje del termopar no se altera.

sean

T_c = Temperatura de la unión

T_F = Temperatura de los extremos del termopar (normalmente se toman como 0°C).

T_a = Temperatura ambiente

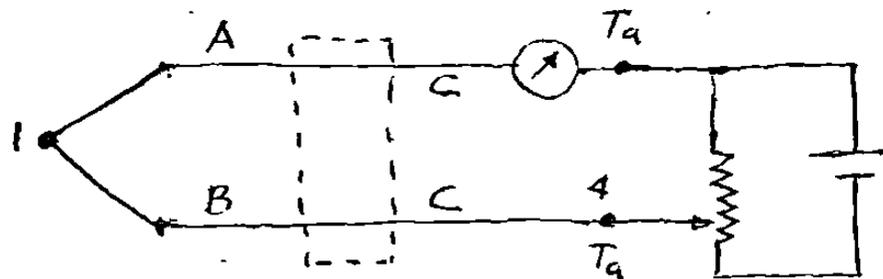


Fig. N^o 3

La diferencia de potencial de cada sector del circuito, se determina de la ecuación (1), reemplazando ΔV y ΔT por dV y dT . Utilizando la ecuación (1) con los cambios indicados e integrando alrededor del circuito, se obtiene:

$$\begin{aligned}
 V_2 - V_3 &= \int_{T_a}^{T_F} \alpha_C dT \\
 V_1 - V_2 &= \int_{T_F}^{T_c} \alpha_A dT \\
 V_5 - V_1 &= \int_{T_C}^{T_F} \alpha_B dT \\
 V_4 - V_5 &= \int_{T_F}^{T_a} \alpha_C dT
 \end{aligned}
 \tag{2A}$$

Si se suman estas ecuaciones, queda:

$$V_4 - V_3 = \int_{T_F}^{T_c} \alpha_A dT + \int_{T_c}^{T_F} \alpha_B dT = \int_{T_F}^{T_c} (\alpha_A - \alpha_B) dT = V_{A,B}$$

(2)

Por lo que el voltaje seebeck resulta independiente de la temperatura ambiente y del coeficiente seebeck de las terminales usadas.

Diferenciando la ecuación (2) con respecto a la temperatura T , queda:

$$(\alpha_B - \alpha_A) dT = dV_{A,B}$$

$$\therefore \frac{dV_{A,B}}{dT} = \alpha_B - \alpha_A = \alpha \quad (3)$$

En donde a " α " se le da el nombre de coeficiente seebeck, del termopar; de esta ecuación se ve la conveniencia de que uno de los elementos que forman el termopar, tenga coeficiente seebeck negativo.

Además del efecto seebeck, al "funcionar" un termopar, están presentes otros fenómenos, como son los efectos Peltier, Thompson, Joule y el de convección de calor. (Este último debido a que la unión y los extremos del termopar, están a temperaturas distintas).

EFFECTO PELTIER

Peltier en 1834 encontró que se libera o se absorbe calor, -- cuando se hace fluir una corriente eléctrica a través de la unión de -- dos materiales conductores de naturaleza distinta (Termopar). La dirección en que circula la corriente eléctrica, determina si el calor es liberado o absorbido en la unión. Este fenómeno se conoce como "efecto - Peltier"

Los sistemas de refrigeración termoeléctrica, son posibles de bido a este efecto.

EFECTO JOULE

El efecto Joule está presente al cerrar el circuito del termopar y circular en el corriente eléctrica.

EFECTO THOMPSON

Si en un circuito termopar abierto, existe en sus elementos, - una distribución uniforme de temperaturas, esta distribución se distorsionará en adición al efecto Joule, al circular en este circuito una corriente eléctrica. Este fenómeno se llama efecto Thompson.

De los efectos presentes en un termopar en "funcionamiento" - se puede inferir que el termopar se puede considerar como una "máquina" térmica reversible", ya que puede convertir energía térmica en eléctrica y viceversa.

Se utilizan también, algunas consideraciones, que se pueden - deducir de las ecuaciones (2) y (3) que se conocen como leyes de los -- termopares y que a continuación se enuncian.

"Ley de los Metales Intermedios"

La inserción de un tercer elemento metálico, en el circuito- del termopar, no afecta la f.e.m. neta de este, si las dos uniones in- troducidas por el tercer metal están a idéntica temperatura.

SI

i = Coeficiente seebeck del metal introducido

T_i = Temperatura de las uniones del metal introducido en el cir- cuito termopar.

$$\Delta V = \int_{T_i}^{T_i} \alpha_i dT = 0$$

Por lo que no se altera el voltaje producido por el termopar.

Este hecho, permite la introducción de algún dispositivo de medición o alguna unión de referencia (que actuaría como el tercer metal). Debido a esto, también es posible el soldar la unión del termopar (siempre y cuando no provoque ningún gradiente de temperatura este metal en la unión).

"Ley de las Temperaturas Intermedias"

Si el circuito de un termopar produce una fem e_1 , cuando la diferencia de temperaturas entre su unión y los extremos libres es $T_2 - T_1$ y una fem. e_2 , cuando la diferencia es $T_3 - T_2$, el termopar producirá una fem. $e_1 + e_2$, si la diferencia de temperaturas es $T_3 - T_1$

$$\text{Si } T_1 < T_2 < T_3 \quad \text{y}$$

α = coeficiente Seebeck del termopar

$$e_1 = \int_{T_1}^{T_2} \alpha dT$$

$$e_2 = \int_{T_2}^{T_3} \alpha \, dT$$

$$\therefore \int_{T_1}^{T_2} \alpha \, dT + \int_{T_2}^{T_3} \alpha \, dT = \int_{T_1}^{T_3} \alpha \, dT = e_1 + e_2 \quad (4)$$

Esto hace posible el uso de tablas para termopares basadas sobre una temperatura de referencia o standard (La temperatura de referencia normalmente usada es de 0°C).

"Ley de los Metales Homogéneos"

Una corriente termoeléctrica, no se puede obtener solamente -- por la aplicación de calor, en un circuito hecho de un solo conductor, homogéneo. (aún con variaciones en su sección transversal).

Como consecuencia de esta ley, se requiere de dos materiales diferentes para cualquier circuito termopar.

Para la medición de temperatura, los termopares se hacen de -- metales puros o aleaciones; para el caso de refrigeración termoeléctrica, -- los materiales usados son semiconductores, por tener un coeficiente -- seebeck alto y un alto valor de:

$$\frac{\alpha^2}{P\lambda}$$

en donde:

P = Resistividad eléctrica

λ = Conductividad térmica

3.- FORMAS Y MATERIALES MAS COMUNMENTE USADOS EN LA CONSTRUCCION DE TERMOPARES.

Las formas más comunes de construir los termopares son:

Soldando las uniones, (utilizando diferentes medios), usando grapas para formar la unión.

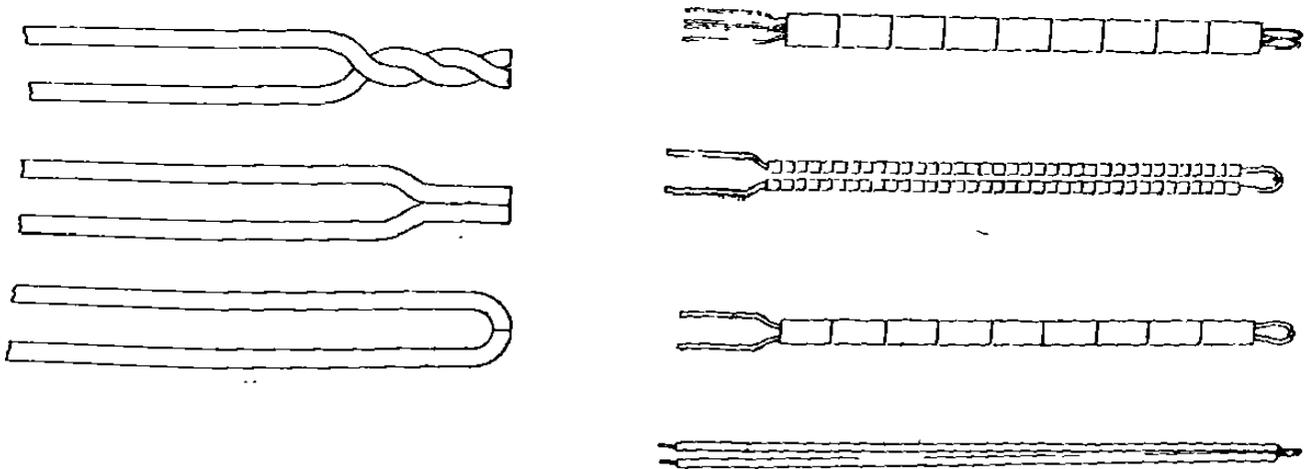


Fig. N°4

MATERIALES PARA TERMOPARES

Cuando el termopar se usa para medir temperatura, los elementos que lo forman, tienen generalmente la forma de alambre. Los metales y aleaciones más comúnmente usadas con este fin son:

TABLA No. 1

Símbolo con que se representa	Nombre del metal o aleación
TP - - - - -	Cobre (generalmente electrolítico)
JP - - - - -	Hierro-99.5% Fe
RN o SN - - - - -	Platino de alta pureza
RP - - - - -	Platino - 13% Rodio
SP - - - - -	Platino - 10% Rodio
BN - - - - -	Platino - 6% Rodio
BP - - - - -	Platino - 30% Rodio
EN o TN - - - - -	55% Cu - 45% Ni (se conoce como - constantan)
EN o KP - - - - -	90% Ni - 10% Cr (se conoce como - cromel)
KN - - - - -	95% Ni, 2% Al, 2% Mn, 1% Si (Alu- mel)
JN - - - - -	Aleación cobre-níquel similar, pe- ro no siempre intercambiable con- EN y TN.
- - - - -	Iridio

Los materiales usados en la fabricación de termopares se clasifican, según sus propiedades termoeléctricas, (no según su composición química) de acuerdo a la ASTM, como se indica en la tabla No. 2

TABLA No. 2

Características de los Termopares

TIPO	Rango de Temperatura en °C	Materiales del Termopar
B	0 a 1820	Platino - 30% rodio-Vs-Platino-6% rodio
E	-270 a 1000	Aleación Ni-Cr-Vs- Aleación Cu-Ni
J	-210 a 1200	Hierro- Vs - Aleación Cu-Ni
K	-270 a 1372	Aleación NiCr-Vs-Aleación Ni-Cr
R	- 50 a 1767	Platino 13% rodio - Vs - Platino
S	- 50 a 1767	Platino 10% rodio - Vs - Platino
T	-270 a 400	Cu - Vs - Aleación Cu-Ni

En esta tabla el primer elemento del termopar, es el de polaridad positiva.

4.- SELECCION DE TERMOPARES

Para la selección del tipo de termopar a usarse, en una medición de temperatura, es necesario conocer algunos datos del medio en don de se va a hacer la medición, de estos, los más importantes son:

- a) Rango de temperatura
- b) Si la temperatura es estable o intermitente
- c) Tipo de ambiente en que va a estar el termopar

Algunos materiales usados en la fabricación de termopares, se deterioran rápidamente (cambiando sus características termoeléctricas) ba jo altas temperaturas y en presencia de substancias tales como oxígeno, a gua, etc. Una técnica muy común para evitar el riesgo de que se dañe o destruya es protegerlo cubriéndole con un tubo cerrado en un extremo, esta protección puede ser de ~~metal~~ o porcelana (según la temperatura y el medio).

De los termopares los datos más importantes que deben conocerse son:

- a) El rango de temperaturas en que se recomienda trabajar (según el fabricante).
- b) Su composición química
- c) Las restricciones atmosféricas de trabajo
- d) Los límites standard de error
- e) Las características termoeléctricas (tablas o gráficas)

Es importante conocer además, las temperaturas a que empiezan a oxidarse con rapidez, los metales y aleaciones con que se construyen --- los termopares. Algunos de estos datos son, por ejemplo; el cobre se oxida con rapidez arriba de 370°C , en el hierro se presenta este fenómeno alrededor de 538°C , las aleaciones conocidas como cromel y alumen soportan --- sin oxidarse 1200°C en forma continua y hasta 1260°C en forma intermitente, el platino, platino 13% rodio y platino 10% rodio hasta 1399°C continuos o 1482°C intermitentes, el platino 30% rodio y el platino 6% rodio --- hasta 1704°C .

Además es deseable conocer, hasta donde sea posible, el comportamiento del termopar, al transcurrir el tiempo de uso; por ejemplo, los termopares de cromel-alumel, tienden a reducir su f.e.m. con el uso.

En la tabla No. 3 se recopilan, el rango de temperaturas recomendado para los tipos más comunes de termopares, así como los límites --- standard de error en ellos.

TABLA No. 3 Límites de error

TIPO	Materiales del Termopar	Rango recomendado de temperatura °C	Rango de Temperatura	Std.	Especial
T	Cobre - Constant	-270 a 400	-184 a - 101	± 1.1/9%	± 5/9 %
			-101 a - 59	± 0.83°C	± 5/9 %
			- 59 a 93	± 5/12%	± 0.40°C
			93 a 371	± 5/12%	± 5/24 %
K	Chromel-Alumel	-270 a 1370	0 a 277	± 2°C	± 1°C
			277 a 1260	± 15/36%	± 5/24 %
E	Chromel-Constant	-270 a 1000	0 a 316	± 1.6°C	± 1.25°C
			316 a 871	± 5/18%	± 5/24 %
J	Hierro-Constant	-210 a 1200	0 a 277	± 2°C	± 1°C
			277 a 760	± 5/12 %	± 5/29 %
R	Platino-13% Rodio-Platino	- 50 a 1767	0 a 530	± 1.5°C	± 1.5°C
			538 a 1482	± 5/36%	
S	Platino-10% Rodio-Platino	- 50 a 1767	0 a 538	± 1.5°C	
			538 a 1482	± 5/36 %	
B	Platino-30% rodio-Platino 6% rodio	0 a 1820	871 a 1705	± 5/18 %	

Nota 1.- En la columna de materiales de esta tabla, el primer elemento es el positivo y el segundo el negativo.

2.- El límite de error de la tabla anterior, es válido solamente si el alambre del termopar, tiene el calibre adecuado.

Una vez que se seleccionó el tipo de termopar, el siguiente paso, es escoger el calibre del alambre con que se construirá. En la tabla No. 4, se recopilan algunos datos que sirven para ese fin. (La vida útil del termopar, depende de escoger adecuadamente el calibre del alambre).

TABLA No. 4

Máxima temperatura recomendada para termopares protegidos
Calibre del Alambre

TIPO	No. 8 3.25 M.M.	No. 14 1.63 M.M.	No. 20 0.87 M.M.	No. 24 0.51 M.M.	No. 28 0.33 M.M.
B				1705°C	
E	871°C	649°C	538	427	427°C
J	760°C	593°C	482°C	371°C	371°C
K	1260°C	1093°C	982°C	871°C	871°C
R y S				1482°C	
T		371°C	260°C	204°C	204°C

AISLAMIENTO DEL TERMOPAR

Es necesario para una correcta medición de la temperatura, -- aislar el termopar (los extremos) tanto eléctricamente como térmicamente.

Los materiales más usuales para este fin son, el algodón, la fibra de vidrio, el asbesto, el teflón, el polivinil, la cerámica, etc.

El tipo de aislamiento se escoge de acuerdo a la temperatura y el medio ambiente en que se instalará el termopar. La tabla no. 5 muestra las condiciones de trabajo de algunos materiales aislantes usados en los termopares.

TABLA No. 5

Nombre del aislante	Temperatura Límite al uso continuo	Temperatura Límite a la simple exposición °C.	Resistencia a la humedad.	Resistencia a la abrasión.
Algodón	93	93	Mala	Adecuada
Polivinil	104	104	Excelente	Excelente
Esmalte y Algodón	93	93	Adecuada	Adecuada
Nylon	126	126	Buena	Buena
Teflón	204	315	Excelente	Excelente
Teflón y fibra de vidrio	315	371 a 538	Excelente a 315°C	Buena
Fibra de vidrio barnizada o con impregnaciones de silicón.	482	538	Adecuada a 204°C mala arriba de 204°C.	Adecuada a 204°C mala arriba de 204°C.
Fibra de vidrio sin impregnación.	538	593	Mala	Adecuada
Asbesto y fibra de vidrio con silicón.	482	593	Buena a 204°C	Adecuada a 204°C mala arriba de esta temperatura.
Fieltro de Asbesto	538	593	Mala	Mala
Asbesto sobre Asbesto	538	593	Mala	Mala
- Refrasable	871	1093	Muy buena	Muy buena

Cuando el material de que está hecho el termopar, no es compatible con el tipo de atmósfera en donde se instalará, es usual proteger al termopar, cubriéndolo con un tubo (cerrado en un extremo), el que puede ser de metal o cerámica, dependiendo de la temperatura y del tipo de atmósfera. Por ejemplo, los tubos de acero al carbón, se usan en temperaturas hasta de 700°C usualmente en atmósferas oxidantes; de acero inoxidable austenítico hasta 370°C en atmósferas reductoras; de acero inoxidable ferrítico, hasta 1150°C tanto en atmósferas oxidantes como reductoras; las aleaciones de alto contenido de níquel, nichromo, inconel, etc. se usan hasta 1150°C en atmósferas oxidantes.

Casi todos los tubos de metal presentan el problema de ser -- "porosos" a temperaturas arriba de 815°C.

Los tubos de cerámica se usan desde temperaturas bajas, (en atmósferas dañinas a los tubos de metal), hasta 1980°C (tubos a base de alumina). Se fabrican además tubos de "metal-cerámica" (cermets), estos son combinaciones de metales y óxidos metálicos, que después de un tratamiento adecuado, tienen alta resistencia a la corrosión y soportan hasta 1425°C en ambas atmósferas.

Cuando la medición de temperatura se va a efectuar en un medio donde la presión es alta o el flujo del medio puede inducir altos esfuerzos en el tubo protector o existe ambas condiciones, es preferible usar un "termoposo" como medio protector del termopar.

El termoposo se maquina (taladra) en una pieza de metal, ca--
pas de soportar las condiciones existentes en el medio.

Este dispositivo se instala soldándolo o atornillándolo (ver-
fig. no. 5)

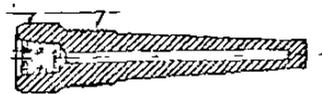
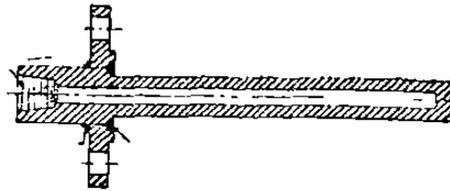


Fig. N^o 5

5.- CONEXION DEL TERMOPAR AL DISPOSITIVO MEDIDOR.

EXTENSIONES.

Normalmente se utiliza una extensión para conectar el termopar con el aparato medidor; esto permite mejoras mecánicas en el circuito del termopar, ajustar la resistencia eléctrica del circuito y en ciertos casos, bajar el costo del mismo, como ocurre con los termopares hechos de metales nobles.

Las extensiones se clasifican en dos categorías, según el tipo de termopares en que se usen.

Categoría I.- Extensiones normalmente usadas para termopares de base metálica (tipos K, J, E y T standard). Estas extensiones se hacen con alambre cuya aleación es igual o muy semejante a la del termopar.

Categoría II.- Extensiones usadas en termopares hechos de metales nobles (Tipos S, R y B standard), y algunos termopares no standarizados.

FUENTES DE ERROR

Al utilizar una extensión para conectar el termopar al medidor, se presentan varias posibilidades de obtener error en la medición de la temperatura.

Las cuatro causas más importantes que inducen errores son:

1.- La existencia de una diferencia de temperatura entre las conexiones de los alambres de la extensión y el termopar. Este error es generalmente grande, cuando se presenta en extensiones de la categoría II.

Representando por P y N los elementos positivo y negativo respectivamente, del termopar y por PX y NX los elementos correspondientes de la extensión (normalmente se agrega una "X" al símbolo con que se representa el material, para representar que dicho elemento se usa como extensión); las siguientes relaciones sirven para calcular el error cometido en la medición.

Salida del termopar = Salida de la extensión

Si se representa por E los voltajes de los elementos, en ecuación anterior, se representa como:

$$E_p - E_n = E_{px} - E_{nx} \quad (5)$$

Si existe una diferencia de temperaturas entre las dos conexiones, de manera que en la unión de P y PX la temperatura sea T_p , y en la unión de N y NX la temperatura sea T_n , existirá una f.e.m. a través de las dos uniones, cuya magnitud es:

$$\Delta E = (E_p - E_{px}) T_p - (E_n - E_{nx}) T_n \quad (6)$$

Sustituyendo (5) en el segundo miembro de (6)

$$\Delta E = (E_p - E_{px}) T_p - (E_p - E_{px}) T_n \quad (7)$$

El valor y signo de E , depende del valor de T_p y T_n y de los voltajes que corresponden a los elementos P y PX a estas temperaturas.

El valor de E representa el error en la medición del termopar. Este error normalmente no excede de un grado de temperatura, - en la medición del termopar, por cada grado de diferencia de temperaturas entre las conexiones del par con la extensión.

Este error se elimina, igualando las temperaturas de las dos conexiones del termopar con los alambres de la extensión.

2.- Otro error proviene de la disparidad en la f.e.m. térmica, entre el termopar y la extensión, para la categoría I.

Esta disparidad resulta de las variaciones que ocurren entre los distintos termoelementos. (error standard para el tipo de termopar o alambres de la extensión). Así es posible tener un error de $\pm 4^\circ\text{C}$, en las combinaciones de termopar y extensión. K/KX y J/JX, donde el límite de error standard, del termopar y los alambres de la extensión son $\pm 2^\circ\text{C}$, para cada uno de ellos.

Estos errores se pueden eliminar substancialmente, seleccionando alambres para la extensión (mediante pruebas), que tengan f.e.m. más cercanas posibles, a las del termopar, al menos a la máxima temperatura que puedan tener las conexiones, entre termopar y extensión.

3.- Cuando en el ensamble del termopar, se utilizan conectores se presenta un error, que puede ser apreciable, si los materiales con que se construyó el conector, tiene una f.e.m. distinta a la de los alambres de la extensión.

Si el material del conector (tercer metal), provoca grandes gradientes de temperatura, se genera una f.e.m. indeseable (cuyo valor puede ser grande) entre los materiales termoelectricos y los extremos -- del conector; esta f.e.m. aparecerá como error, en la salida del termopar.

Es entonces importante, mantener una diferencia de temperaturas muy bajas a través del conector.

4.- Aparecerá un error en la medición, si se conectan con polaridad invertida, los alambres de la extensión y el termopar, o los alambres de la extensión y el aparato medidor.

Cuando es solo una inversión en la polaridad, es muy fácil detectarlo, y hacer la corrección; cuando son dos las inversiones de la polaridad, el error puede persistir sin detección.

6.- Calibración del Termopar.

Por calibración de un termopar, se entiende, la determinación de los voltajes que genera, a distintas temperaturas; el número de mediciones, debe ser suficiente para poder interpolar aceptablemente, los voltajes de las temperaturas intermedias.

La calibración se puede realizar, utilizando un dispositivo -- medidor de temperatura patrón (Termómetro o termopar patrón) y un medio de temperatura controlada, donde el termopar y el dispositivo patrón se instalarán, para que soporten la misma temperatura; de manera que el voltaje generado por el termopar, se hace corresponder a la temperatura indicada por el dispositivo tomado como patrón.

Otra manera de calibrar un termopar, es utilizar los llamados puntos fijos del IPTS-68 (The International Practical Temperature Scale of 1968).

Cuando se utiliza un patrón para la calibración del termopar, previamente el patrón se calibra con los puntos fijos IPTS-68.

En la tabla No. 6 se establecen los puntos fijos IPTS-68, y la temperatura que se asigna a cada uno de ellos en °K y °C.

TABLA No. 6

PUNTOS FIJOS IPTS-68

Estado de Equilibrio (Presión Atmosférica standard)	Valor asignado de temperatura $T_{68}^{\circ}\text{K}$ $t_{68}^{\circ}\text{C}$.	
Equilibrio entre las fases sólida, líquida y vapor del hidrógeno en equilibrio (Punto triple del hidrógeno en equilibrio)	13.81	-259.34
Equilibrio entre las fases líquida y vapor del hidrógeno en equilibrio a una presión de 33330.6 N/M ² .	17.042	-256.108
Equilibrio entre las fases líquida y vapor del hidrógeno en equilibrio (Punto de ebullición del hidrógeno en equilibrio).	20.28	-252.87
Equilibrio entre las fases líquida y vapor del neón (Punto de ebullición del neón).	27.102	-246.048
Equilibrio entre las fases líquida, sólida y vapor del oxígeno (Punto triple del oxígeno).	54.361	-218.789
Equilibrio entre las fases líquida y vapor del oxígeno (punto de ebullición del oxígeno).	90.188	-182.962
Equilibrio entre las fases sólida, líquida y vapor del agua (punto triple del agua).	273.16	0.01
Equilibrio entre las fases líquida y vapor del agua (punto de ebullición del agua).	373.15	100.0
Equilibrio entre las fases líquida y sólida del zinc (punto de solidificación del zinc)	692.73	419.58
Equilibrio entre las fases líquida y sólida de la plata (Punto de solidificación de la plata).	1235.08	961.93
Equilibrio entre las fases líquida y sólida del oro (Punto de solidificación del oro).	1337.58	1064.43

Además de los puntos fijos IPTS-68 se utilizan, los llamados "puntos de referencia secundarios".

La tabla No. 7 contiene los puntos secundarios y la temperatura que se asigna a cada uno de ellos en °C.

TABLA No. 7

Puntos de Referencia Secundarios.
(Presión Atmosférica Standard)

	Temperatura en °C
Punto de ebullición del hidrógeno normal	-252.753
Punto de ebullición del nitrógeno	-195.802
Punto de sublimación del dióxido de carbono	- 78.476
Punto de solidificación del mercurio	- 38.832
Punto de solidificación del agua	0.00
Punto triple del ácido Benzoico (Presión no std.)	122.37
Punto de solidificación del indio	156.634
Punto de solidificación del bismuto	271.442
Punto de solidificación del cadmio	321.108
Punto de solidificación del plomo	327.502
Punto de solidificación del antimonio	630.74
Punto de solidificación del aluminio	660.37
Punto de solidificación del cobre	1084.8
Punto de solidificación del níquel	1455.0
Punto de solidificación del paladio	1554.0
Punto de solidificación del platino	1768.0

También se usa el punto de solidificación del estaño, cuya temperatura asignada es 231.9681°C.

La calibración del termopar, permite medir la temperatura con una aproximación hasta de 0.1°C , dependiendo del tipo de termopar, del patrón y del dispositivo usado para controlar la temperatura ambiente, en que se hizo la calibración.

Lo más frecuente es que esta aproximación en los valores de temperatura sea de 0.1 hasta 10°C .

En la calibración utilizando un patrón std, (calibrado previamente con los puntos IPTS), el patrón se escoge de acuerdo al rango de temperaturas de trabajo del termopar, así para temperaturas de -260°C hasta 630°C , se puede usar un termómetro de resistencia de platino std; los termopares tipo R y S se pueden usar como patrones en el rango de 630°C hasta 1200°C para temperaturas de 1064°C en adelante, se acostumbra usar un pirómetro óptico.

7.- Conexión de Termopares

Los termopares pueden ser conectados en serie o en paralelo.

La conexión serie recibe también el nombre de termopila; la conexión paralelo no tiene otro nombre especial.

Si se conectan "n" termopares del mismo tipo en serie, el voltaje en terminales será "n" veces el de un solo termopar, siempre y cuando, todos los termopares tengan la unión caliente a la misma temperatura; de esta manera el dispositivo se hace más sensible; esto puede ser útil cuando la diferencia de temperaturas entre la parte caliente y la fría, es pequeña.

Si los termopares de la temperatura, no están todos a la misma temperatura, el voltaje en terminales, dividido en "n" corresponderá a la temperatura promedio, del medio donde se instaló la termopila.

La conexión en paralelo, de termopares del mismo tipo, se utiliza para medir la temperatura promedio de varios puntos; en este tipo de conexión, siempre habrá errores en la medición (generalmente pequeños) debido a que se establece, un pequeño flujo de corriente eléctrica entre las terminales de los termopares, producida por la diferencia de potencial que existe entre las uniones, esto hace que la resistencia eléctrica de los elementos que forman los termopares, tengan influencia en el voltaje medido (los voltajes generados por un termopar se deben medir en circuito abierto).

8.- Constante de Tiempo del Termopar.

Al utilizar un termopar como elemento para determinar la temperatura de un medio, es importante conocer la constante de tiempo del termopar, ya que dependiendo del valor de esta constante se podrá conocer, si el termopar en cuestión es o no adecuado para la medición.

El tiempo que dura el transitorio del termopar, es decir, el tiempo que tarda el termopar en generar un voltaje que represente la temperatura del medio, depende del valor de la constante de tiempo del termopar. (Para un sistema lineal de primero orden, el transitorio depende solo, de la constante de tiempo del sistema).

Cuando la temperatura del medio cambia con el tiempo, es cuando el conocimiento de la constante de tiempo del termopar se hace indispensable; ya que por ejemplo, en el caso de variación periódica de temperatura, si el período es menor que la duración del transitorio, el termopar indicará siempre, una temperatura distinta a la del medio (que pueda ser un valor muy alejado del correcto), o cuando la temperatura varía linealmente con el tiempo, el termopar dará en cualquier instante una temperatura atrasada, pero con el conocimiento del valor de la constante de tiempo, se podrá calcular, para ese instante, el valor correcto de la temperatura.

BALANCE TÉRMICO DE UN SISTEMA CON RESISTENCIA TÉRMICA
INTERNA PEQUEÑA

Cuando en un sistema térmico, la resistencia térmica interna (de valor $\frac{L}{KA}$), es pequeña comparada con su resistencia térmica externa (del valor $\frac{1}{hA}$), se puede considerar sin mucho error, que todos los puntos del sistema tienen en cualquier instante, la misma temperatura.

En cuerpos cuya forma sea semejante a una placa, esfera ó cilindro, el error que se comete, al hacer la consideración mencionada resulta menor del 5%, cuando la resistencia térmica interna, sea menor -- del 10% de la resistencia térmica externa.

El cociente obtenido al dividir la resistencia térmica interna, en la resistencia térmica externa, se conoce como número o módulo de Biot.

$$N_{Bi} = \frac{hL}{K}$$

En donde:

N_{Bi} = Módulo de Biot

h = Coeficiente de película promedio

K = Conductividad térmica del sólido (cuerpo)

A = Área (de la superficie exterior o de la sección transversal del sólido).

Considérese un pequeño cuerpo fig. (6) con temperatura uniforme $T(t)$, de manera que cuando el tiempo se tome como cero, se introduzca en un fluido que tiene una temperatura diferente a él.

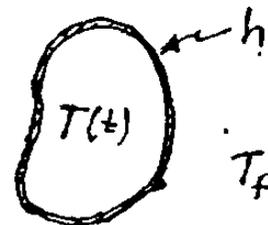


Fig. N°6

Desperdiciando la radiación, la razón de cambio en la capacidad térmica del cuerpo, debe ser igual a la pérdida (o ganancia) de calor por convección; es decir:

$$- pvc \frac{dT}{dt} = hS (T - T_f) \quad (8)$$

En donde:

h = Coeficiente de película promedio en $\text{Kcal/m}^2\text{-hora} - ^\circ\text{C}$

S = Superficie exterior del cuerpo en m^2

T = Temperatura instantánea del cuerpo en $^\circ\text{C}$

p = Densidad del cuerpo en Kgm/m^3

c = Calor específico del cuerpo en $\text{Kcal/Kgm} - ^\circ\text{C}$

v = Volumen del cuerpo en m^3

T_f = Temperatura del fluido, donde se introdujo el cuerpo, en $^\circ\text{C}$

t = Tiempo en horas medido a partir de que se introdujo el cuerpo en el fluido.

Haciendo $D = \frac{d}{dt}$ en la ecuación (8)

tenemos:

$$- pvcDT = hS (T - T_f)$$

$$\therefore T = \frac{hS T_f}{hS + PVCD} = \frac{T_f}{1 + \frac{PVC}{hS} D} \quad (9)$$

Por lo que de acuerdo a la definición de constante de tiempo para un sistema lineal de primer orden, este sistema térmico tiene por

constante de tiempo:

$$C_T = \frac{PVC}{hS} \quad (10)$$

La unión del termopar, generalmente cumple con las condiciones para que se le pueda considerar, como un cuerpo con todos sus puntos a la misma temperatura. (El cumplimiento de esta condición no depende solamente de las dimensiones de la unión, sino también, de las características físicas y dinámicas del fluido).

Por lo anterior, la constante del termopar tendrá por fórmula la ecuación (10).

La ecuación para determinar la temperatura del termopar (cuerpo) en cualquier instante, se obtiene resolviendo la ecuación (8), tomando en cuenta que la temperatura del fluido puede ser también función del tiempo.

Respecto a la temperatura del fluido, se pueden considerar tres casos, que se asemejan mucho a lo que puede suceder en la medición de temperaturas.

- 1° La temperatura del fluido es constante
- 2° La temperatura del fluido cambia linealmente con el tiempo
- 3° La temperatura del fluido cambia periódicamente con el tiempo, - en forma senoidal.

Solución de la ecuación diferencial (8), para el 1er. caso---
si en la ecuación (8) se hace

$$Z = T - T_f \quad \text{y} \quad \frac{dZ}{dt} = \frac{dT}{dt} \quad \text{obtenemos}$$

$$- PVC \frac{dZ}{dt} = hS \quad (H)$$

$$\therefore \frac{dZ}{Z} = - \frac{hS}{PVC} dt$$

integrando

$$\ln Z = - \frac{hS}{PVC} t + K_1$$

$$\therefore Z = e^{- \frac{hS}{PVC} t + K_1}$$

$$Z = K_2 e^{- \frac{hS}{PVC} t} \quad (12)$$

Para evaluar K_2 , tenemos, que si cuando $t = 0$, $Z = T_i - T_f = Z_i$. Sustituyendo estos valores en la ecuación (12), obtenemos el valor de K_2

$Z_i = K_2$ por lo que la ecuación (12) queda:

$$Z = Z_i e^{- \frac{hS}{PVC} t} \quad (13)$$

De acuerdo a la ecuación (10), el exponente tiene el valor inverso-negativo, de la constante de tiempo del sistema, por lo que se obtiene:

$$Z = Z_i e^{-\frac{1}{CT} t}$$

y resolviendo esta ecuación para la temperatura T ;

$$T = T_f + Z_i e^{-\frac{1}{CT} t} \quad (14)$$

En donde:

T = Temperatura que tiene la unión caliente del termopar, en cualquier instante " t "

Z_i = Temperatura que inicialmente tenía el termopar, antes de ser introducido en el medio ambiente, al que se va a medir la temperatura.

T_f = Temperatura del medio, al que va a medirse la temperatura.

De la ecuación (14) se ve, que cuando un termopar se introduce a un medio con temperatura distinta a la que el tenía inicialmente, o cuando la temperatura del medio en la que el termopar está instalado, cambia bruscamente, la temperatura obtenida del termopar, inmediatamente después que se introdujo al medio, o inmediatamente después del cambio brusco de temperatura en el medio, no es la temperatura correcta, sino-- hasta después que el tiempo transcurrido sea lo suficientemente grande, para hacer que el segundo sumando del lado derecho de la ecuación (14), tenga un valor despreciable; el valor de este tiempo se conoce como duración del transitorio y depende del valor de la constante de tiempo C_T .

Para medir la duración del transitorio, se toma como tiempo "cero" el instante en que el termopar se introduce al medio que va a medirse la temperatura, o al instante en que se operó el cambio brusco de temperatura.

Cuando el tiempo transcurrido es numéricamente igual a C_T , - la temperatura dada por el termopar, es la del medio más un 36.8% de la diferencia de temperatura, entre la inicial del termopar y la actual del medio.

La constante de tiempo del termopar, depende, de entre otros factores, del coeficiente de película y este a su vez, es función de la diferencia de temperaturas que hay entre la superficie del termopar y la del medio, ciertas propiedades físicas del medio y la forma y posición -

Pudiera ser útil entonces, una fórmula para determinar la temperatura del termopar, en cualquier instante en la que no intervenga el coeficiente de película.

Las formas más comunes de la unión de un termopar, es muy semejante o igual a un cilindro o a una esfera.

Para el caso de formas cilíndricas horizontales o verticales la fórmula empírica más usual, para el cálculo del coeficiente de película en procesos de convección libre es:

$$N_u = C (N_{gr} N_{pr})^m$$

El valor de C y m, dependen del valor del producto $N_{gr} N_{pr}$.

donde:

$$N_u = \text{Número de Nusselt} = \frac{hL}{K}$$

$$N_{gr} = \text{Número de Grashof} = \frac{g \beta (T - T_f) L^3 \rho^2}{\mu^2}$$

$$N_{pr} = \text{Número de Prandtl} = \frac{c_p \mu}{K}$$

h = Coeficiente de película en $\text{Kcal/m}^2 \cdot \text{hora} \cdot ^\circ\text{K}$

L = Término con unidades de longitud, en mts.

K = Conductividad térmica del fluido, $\text{Kcal/m-hora} \cdot ^\circ\text{K}$

T = Temperatura de la superficie del cilindro (termopar) en $^{\circ}\text{C}$

T_f = Temperatura del fluido, en $^{\circ}\text{C}$

β = Coeficiente de expansión del gas $^{\circ}\text{K}^{-1}$

C_p = Calor específico a presión constante del medio, en $\text{Kcal/Kgm} \cdot ^{\circ}\text{K}$

u = Viscosidad dinámica del fluido, en Kgm/m-hora

g = Aceleración de la gravedad en, m/hora^2

Todas las propiedades físicas del fluido se determinan a la temperatura media de la película

$$T_m = \frac{T + T_f}{2}$$

Para $10^4 < N_{gr} N_{pr} < 10^9$ y cilindros verticales, la fórmula para calcular el coeficiente de película es:

$$Nu = 0.59 (N_{gr} N_{pr})^{1/4} \quad (15)$$

Para este caso, l = altura del cilindro

$$\therefore h = 0.59 \left(\frac{k^3 \beta C_p g}{u l} \right)^{1/4} (T - T_f)^{1/4}$$

$$\text{Si } R = 0.59 \left(\frac{k^3 \beta C_p g}{u l} \right)^{1/4}$$

$$\text{y } z = T - T_f \quad \therefore \frac{dz}{dt} = \frac{dT}{dt}$$

se obtiene:

$$k = R z^{1/4}$$

Siendo estos valores en la ecuación (11) queda:

$$-\frac{dz}{dt} = RSZ^{5/4}$$

Se integran las variables e integrando, se obtiene

$$4z^{-1/4} = \frac{RS}{PV \cdot CP} \cdot t + C_1 \quad (16)$$

$$z_i = T_i - T_f = z_i, \text{ cuando } t = 0$$

T_i = temperatura inicial del termopar

Siendo estos valores en la ecuación (16), se obtiene:

$$C_1 = 4z_i^{-1/4}$$

$$\therefore 4z^{-1/4} = \frac{RS}{4PV \cdot CP} \cdot t + z_i^{-1/4}$$

$$z = \frac{1}{\left(\frac{RS}{4PV \cdot CP} \cdot t + z_i^{-1/4} \right)^4} \quad (17A)$$

$$y = z + \frac{1}{\left(\frac{RS}{4PV \cdot CP} \cdot t + z_i^{-1/4} \right)^4} \quad (17)$$

La ecuación (17) es válida si $T > T_f$ o si $T < T_f$, en este último caso y en la aplicación de la ecuación (17), se deberá poner

$$z = T_f - T$$

Sustituyendo este valor de Z en la ecuación (17A) y despejando T_1 se obtiene:

$$T = T_b - \frac{1}{\left(\frac{RS}{4PV} \frac{CP}{CP} t + Z_i^{-1/4}\right)^4} \quad (18)$$

Si en las ecuaciones (17) y (18) se hace

$$\frac{RS}{4PV} \frac{CP}{CP} t = N$$

$$\therefore t = \frac{4PV}{RS} \frac{CP}{CP} N \quad (19)$$

Mediante la ecuación (19) se obtendrá el tiempo mínimo necesario que debe transcurrir, para que la lectura tenga el error aceptado en la medición, esto dependerá del rango de temperaturas que se estén midiendo, de la precisión que se desee en la medición, y del error standard del termopar que se este usando.

Dependiendo del tipo de termopar, el error standard va de -- 0.4°C a 2°C (tabla No. 3), por lo que si se hace $n = 1$ en la ecuación (19), se tendrá un error de menos de un grado en la medición, error que para la mayoría de los casos es aceptable (podiera incluso ser este error menor que el std. del termopar usado).

Por lo que el tiempo

$$t = \frac{4PV}{RS} \frac{CP}{CP} \quad (20)$$

Se puede considerar, como el mínimo necesario, para que la temperatura dada por el termopar, sea la temperatura del medio que rodea al termopar.

Para $10^9 < N_{pr}$ $N_{gr} < 10^{13}$ y cilindros verticales.

$$N_{u} = 0.10 (N_{gr} N_{pr})^{1/3}$$

en procesos de convección libre

Despejando h de esta ecuación, substituyendo en (11) y resolviendo la ecuación diferencial resultante, se obtiene:

$$z = \frac{1}{\left(\frac{SR}{3PV} \frac{t + z_i^{-1/3}}{CP} \right)^3} \quad (21)$$

En donde:

$$R = 0.10 \left(\frac{g \kappa^2 \beta \rho^2 CP}{u} \right)^{1/3}$$

Despejando T de (21)

$$T = T_0 + \frac{1}{\left(\frac{SR}{3PV} \frac{t + z_i^{-1/3}}{CP} \right)^3} \quad (22)$$

Siguiendo el mismo criterio que en el caso anterior, el valor del tiempo necesario para que la temperatura dada por el termopar se

pueda considerar la que tiene el medio que rodea al termopar, es

$$\frac{SR}{3PV \cdot CP} \cdot t = 1$$

$$\therefore t = \frac{3PV \cdot CP}{SR} \quad (23)$$

Para el caso de cilindros horizontales, convención libre y $10^4 < N_{gr} N_{pr} < 10^9$, el coeficiente de película se calcula mediante la fórmula.

$$Nu = 0.53 (N_{gr} N_{pr})^{1/4}$$

En este caso, $L =$ Diámetro del cilindro

Despejando h de esta ecuación, sustituyendo en (11) y resolviendo la ecuación diferencial resultante se obtiene:

$$z = \frac{1}{\left(\frac{SR}{4PV \cdot CP} t + z_i^{-1/4} \right)^4} \quad (24)$$

En donde:

$$R = 0.53 \left(\frac{P^2 K^3 B C_{pg}}{UL} \right)^{1/4}$$

Despejando T de (24)

$$T = T_6 + \frac{1}{\left(\frac{SR}{4PV \cdot CP} t + z_i^{-1/4} \right)^4}$$

Siguiendo los mismos pasos, que en los casos anteriores:

$$t = \frac{4PV \cdot CP}{SR}$$

nos dará el tiempo para que el termopar registre la temperatura del medio que lo rodea.

Para cilindros horizontales, convección libre y

$10^9 < N_{gr} N_{pr} < 10^{12}$, el coeficiente de película se calcula mediante la fórmula empírica.

$$Nu = 0.13 (N_{gr} N_{pr})^{1/3}$$

Heicendo las substituciones adecuadas, se obtiene para T , -- una ecuación igual a la (22), teniendo R el valor:

$$R = 0.13 \left(\frac{g \beta C_p k^2 P^2}{u} \right)^{1/3}$$

El tiempo para que el termopar registre la temperatura del medio que lo rodea, viene dado por la ecuación (23).

Para el caso de esferas, convección libre y

$10^3 < N_{gr} N_{pr} < 10^9$, el coeficiente de película se obtiene-- mediante la fórmula empírica:

$$Nu = 0.63 (N_{gr} N_{pr})^{1/4}$$

Las ecuaciones para T y el tiempo mínimo necesario para que el termopar registre la temperatura del medio que lo rodea, son (17) y (20) respectivamente, con

$$R = 0.63 \left(\frac{K^3 \beta C_p g P^2}{uL} \right)^{1/4}$$

Para esferas, convección libre y

$$N_{gr} N_{pr} > 10^9$$

El coeficiente de película se puede calcular de la fórmula empírica.

$$Nu = 0.15 (N_{gr} N_{pr})^{1/3}$$

Las ecuaciones para T y el tiempo para que el termopar proporcione la temperatura del medio que lo rodea son (22) y (23) respectivamente; con

$$R = 0.15 \left(\frac{g \beta K^2 P^2 C_p}{u} \right)^{1/3}$$

Las fórmulas para el cálculo del coeficiente de película h , en el caso de convección forzada, tanto en flujo laminar como turbulento no dependerá explícitamente de $Z = T - T_f$, por lo que estimando un valor de h , con las fórmulas apropiadas, según el caso, se puede determinar el tiempo mínimo para la lectura, a partir de la ecuación para C_T (10)

Solución de la ecuación (8) para el 2o. caso.

Si a partir de cierto instante, (tomando como tiempo cero),- la temperatura del fluido empieza a variar linealmente con el tiempo, la ecuación que proporciona la temperatura instantánea de fluido es:

$$T_f = At + B \quad (25)$$

En donde B, es la temperatura que tiene el fluido cuando el tiempo es cero, y A es una constante que depende del calor proporcionado al fluido (medio) o liberado por el, por unidad de tiempo.

Sustituyendo la ecuación (25) en la (8) se obtiene

$$-PVC \frac{dT}{dt} = hS (T - At - B)$$

$$\therefore \frac{dT}{dt} + \frac{hS}{PVC} T = \frac{hSA}{PVC} t + \frac{hSB}{PVC}$$

La ecuación (26) es una ecuación diferencial lineal de primer orden, cuya solución es:

$$T = m e^{-\frac{hS}{PVC} t} + At + B - \frac{PVCA}{hS}$$

Sustituyendo las condiciones iniciales

$$T = B \text{ cuando } t = 0$$

en la ecuación (27), se obtiene para m el valor

$$m = \frac{PVCA}{hS}$$

y sustituyendo este valor en (27) se obtiene:

$$T = At + B - \frac{PVCA}{hS} \left(1 - e^{-\frac{hS}{PVC} t} \right) \quad (28)$$

Esta ecuación muestra que el termopar nunca registrará la temperatura instantánea que tiene el medio, ya que habrá, cuando el tiempo transcurrido es grande, una diferencia constante entre el valor de la temperatura del medio, y la registrada por el termopar; esta diferencia vale según la ecuación (28).

$$\frac{PVCA}{hS}$$

Para determinar el tiempo que debe transcurrir, para que la exponencial tenga un valor despreciable, es conveniente estimar un valor de h , con la fórmula adecuada, ya que si se sustituye en (26) una ecuación para h en función de T_0 , la ecuación resultante es una ecuación diferencial no lineal, que presenta cierto grado de dificultad resolverla.

Como el error en la temperatura dada por el termopar es constante, una vez estimado el valor de h , este error se puede calcular con la ecuación (29), y conocerse entonces, el valor de la temperatura del medio que rodea al termopar en cualquier instante, a partir del tiempo en que la exponencial tenga un valor despreciable.

Solución de la ecuación diferencial (8) para el tercer caso.

Hay una infinidad de maneras de variar la temperatura periódicamente con el tiempo, sin embargo, una forma que se ajusta a muchos casos prácticos es la variación tipo senoidal.

Suponiendo para la temperatura del medio una variación de la forma.

$$T_f = A + B \operatorname{sen} \omega t \quad (30)$$

En donde A es una constante y además es la temperatura promedio de la variación, B y ω son también constantes, y representan la amplitud y la frecuencia respectivamente, de la variación de temperatura.

Sustituyendo (3) en (8) se obtiene:

$$\begin{aligned} -PVC \frac{dT}{dx} &= hS (T - A - B \operatorname{sen} \omega t) \\ \therefore \frac{dT}{dx} + \frac{hS}{PVC} T &= \frac{hSA}{PVC} + \frac{hSB}{PVC} \operatorname{sen} \omega t \quad (31) \end{aligned}$$

La ecuación (31) es una ecuación diferencial lineal de primer orden, cuya solución es:

$$T = e^{-\frac{hS}{PVC} x} + A + \left(\frac{hS}{PVC}\right) \frac{B}{\left(\frac{hS}{PVC}\right)^2 + \omega^2} \operatorname{sen} \omega t - \left(\frac{hS}{PVC}\right) \frac{B\omega}{\left(\frac{hS}{PVC}\right)^2 + \omega^2} \operatorname{cos} \omega t$$

En este caso, se debe seguir el mismo criterio que en el segundo caso, en cuanto a estimar, el valor de h , para terminar el tiempo en que la exponencial tiene un valor despreciable, de manera que, si el tiempo transcurrido es de un valor tal, que

De la ecuación (32) se deduce que la temperatura obtenida -- por el termopar estará siempre retrasada y con una amplitud menor que la real, ya que R es menor que la unidad; pero estará oscilando alrededor del mismo valor promedio A que la temperatura real.

Esto puede ocasionar que se obtengan lecturas que esten muy alejadas de la realidad.

Para el caso de que la temperatura esté variando periódicamente con el tiempo, (con cualquier forma de la onda de variación); se puede utilizar la serie de fourier que representa a dicha variación, es decir que:

$$T_f = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (33)$$

Sustituyendo el valor de la ecuación (33) en (8) queda:

$$\frac{dT}{dt} + \frac{hS}{PVC} T = \frac{hS}{PVC} \left[\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \right]$$

La solución de esta ecuación diferencial es (ya simplificado el resultado)

$$T = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} F \frac{a_n \cos(n\omega t - e) + b_n \sin(n\omega t - e)}{F^2 + \omega^2 n^2} + C_1 e^{-Ft}$$

En donde:

$$F = \frac{hS}{PVC}$$

$$e = \arctan \frac{NW}{F}$$

La conclusión será la misma que para cuando la temperatura--
variaba en forma senoidal.

9.- Uso de las Tablas de Voltajes

Como se mencionó en el capítulo 2, al haber una diferencia de temperaturas, entre la unión y los extremos libres, del termopar, en estos, se establece un voltaje que es proporcional a dicha diferencia de temperaturas.

Basándose en este hecho, se han elaborado tablas y gráficas para los distintos tipos, de termopares, en las que se proporcionan los voltajes, que corresponden a la temperatura que tiene la unión, cuando los extremos del termopar, están a una temperatura fija, que normalmente se toma como 0°C.

El valor de estos voltajes se determina mediante una serie de potencias de la forma:

$$E = A_0 + A_1T + A_2T^2 + A_3T^3 + A_4T^4 + \dots$$

En donde:

E = Voltaje en microvolts

T = Temperatura en grados centígrados

El valor de los coeficientes en esta ecuación depende del tipo de termopar y del rango de temperatura.

El orden de polinomio, depende de la aproximación deseada --

y del tipo de termopar, en algunos casos por ejemplo, para el termopar tipo T, la ecuación más exacta es de orden 14; sin embargo, normalmente se utilizan ecuaciones de orden 4, 3, o 2, como aproximaciones.

Al medir el voltaje de un termopar, lo más probable es que los extremos de este, estén a la temperatura ambiente y esta sea distinta de 0°C . Como las tablas se construyen considerando que los extremos del termopar están a 0°C , para poder usarlas, cuando esto no se cumple, se puede utilizar alguno de los siguientes procedimientos.

- a) Poner los extremos del termopar en un medio que este a 0°C (Un recipiente con hielo por ejemplo) y de ahí sacar las conexiones al aparato medidor, utilizando extensiones.
- b) Hacer la lectura del voltaje, con los extremos del termopar a la temperatura ambiente y luego a este valor, sumarle el voltaje correspondiente a la temperatura ambiente, cuando los extremos del termopar están a 0°C .
- c) Algunos aparatos medidores, permiten hacer lo siguiente:
Conectar al aparato medidor, los extremos del termopar a la temperatura ambiente, y conociendo la temperatura ambiente y el voltaje que le corresponde, según el tipo de termopar usado, hacer la corrección de temperatura directamente en el aparato; de esta manera a los voltajes leídos serán, como si los extremos del termopar estuvieran a 0°C .

10.- Conclusiones.

De todo lo expuesto, se concluye lo siguiente:

Los termopares son dispositivos que sirven para medir temperatura, desde la vecindad de 0°K , hasta los $3,000^{\circ}\text{C}$. La aproximación en la medición llega hasta 0.1°C , en ciertos tipos de termopares.

Además de este uso, sirven para construir sistemas de refrigeración por efecto termoeléctrico.

Para escoger el tipo de termopar es indispensable conocer, el rango de temperaturas y el tipo de atmósfera en que se instalará.

En los casos de variación de la temperatura con el tiempo, - es necesario determinar la constante de tiempo del termopar. Si la variación es periódica, deberá calcularse el retraso y la atenuación de la amplitud, para determinar si al termopar sirve o no, para la medición de temperatura.

*El termopar debe calibrarse antes de su instalación y debe--
checharse periódicamente con un patrón, ya que con el uso, varían sus ca-
racterísticas termoeléctricas.*

*Se debe tener cuidado, para evitar errores en la medición, -
de no hacer conexiones con polaridad invertida y mantener a la misma tem*

peratura las conexiones entre el termopar y la extensión.

Se puede construir un termopar con dos materiales distintos-cualquier, (aún no std) y con el, hacer mediciones de temperatura siempre que se haya calibrado previamente.

B I B L I O G R A F I A

- 1.- *The Theory and Properties of Thermocouple elements* A.S.T.M.
- 2.- *Manual on the use of thermocouples in temperature measurement*
A.S.T.M. STP 470A
- 3.- *Temperature Measurement in Engineering*
Volumen I y II H. Dean Baker.
- 4.- *Thermocouple Reference Tables*
N.B.S. Monograph
- 5.- *Analysis of heat and mass transfer* E.R.G. Eckert
Robert M. Drake
- 6.- *Principios de transferencia de calor*
Frank Kreith
- 7.- *Direct Energy Conversion*
Stanley W. Angrist

