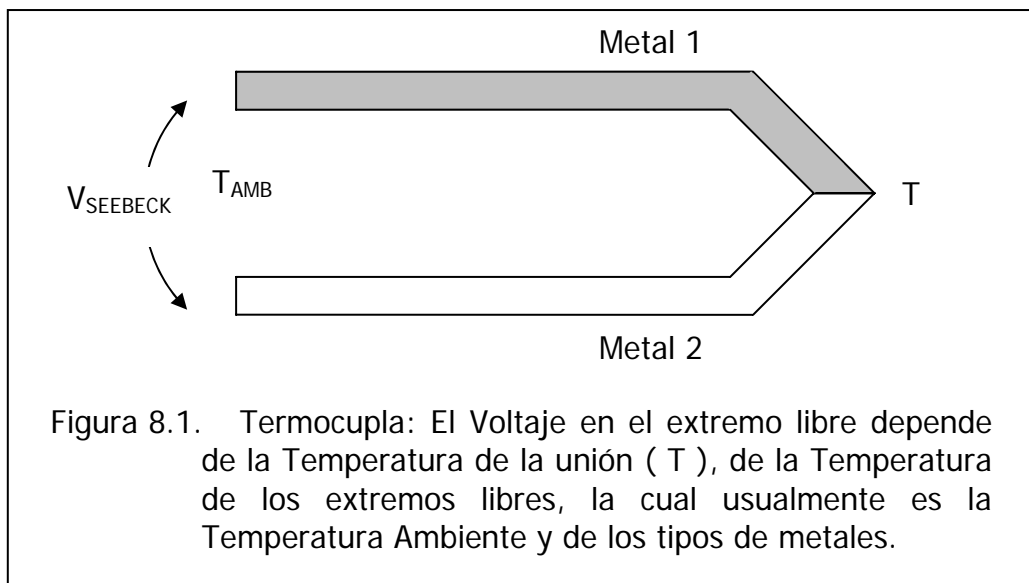


## CAPÍTULO 8. "LA TERMOCUPLA"

### Marco Teórico

Una Termocupla se forma al unir dos metales diferentes, como indica la Figura 8.1. Como resultado de esta unión aparece entre los extremos libres de los metales una diferencia de potencial que depende de la Temperatura. Este fenómeno se conoce como Efecto Seebeck, quien en 1821 estudió su comportamiento. Este efecto permite calibrar la Termocupla para usarla como un Termómetro.



El Efecto Seebeck es la suma de dos efectos independientes, a saber:

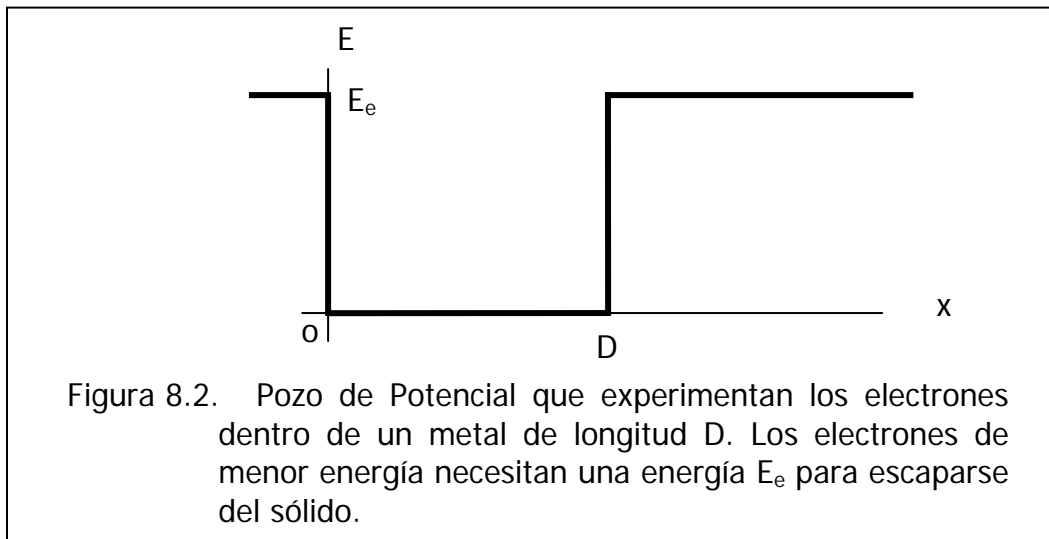
1. El Potencial de Contacto debido a la unión metal-metal y
2. El Doble Voltaje de Thomson debido a que cada uno de los dos metales tiene una diferencia de Temperatura entre sus extremos. J. J. Thomson (más conocido por su título de Lord Kelvin) estudió este efecto en 1851.

A continuación vamos a estudiar cada uno de estos efectos por separado:

El Potencial de Contacto metal-metal  $V_C$ .

La unión de dos metales diferentes (Elementos metálicos y/o aleaciones) genera una diferencia de potencial que depende de la Temperatura. En general el voltaje que aparece entre los metales es tan pequeño (del orden de milivoltios), que para la mayoría de las aplicaciones eléctricas puede considerarse que los metales están a un mismo potencial. Sin embargo, este pequeño voltaje es también responsable de corrosiones y oxidaciones en los metales, por ejemplo: en los bornes de plomo de las baterías de un carro, donde se unen con los cables de cobre.

En un metal los electrones de la última capa de sus átomos están tan poco ligados a estos que permanecen sumergidos dentro de todo el metal como electrones "casi-libres". No son enteramente libres porque no pueden salir del metal. Simplificando podemos considerar que los electrones dentro del metal están bajo la acción de un potencial producido por el material, que es prácticamente constante (excepto en pequeñas variaciones muy cerca de cada átomo), como se presenta, para el eje  $x$ , en la Figura 8.2:



Si  $n$  representa el número de electrones por unidad de volumen, definamos:

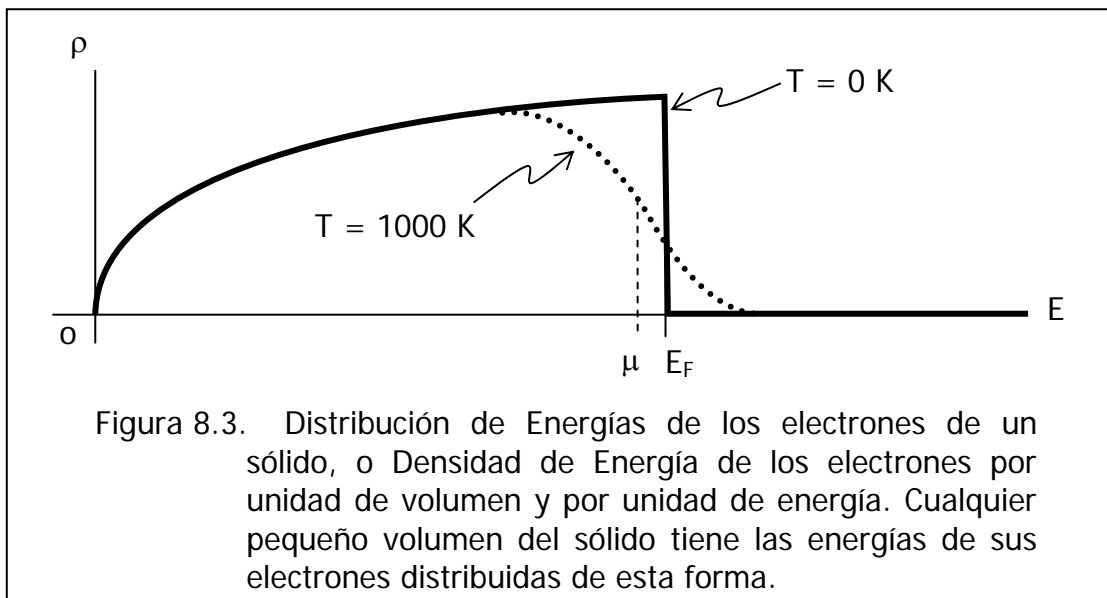
$\rho = \frac{dn}{dE}$ , como la Densidad de electrones por unidad de Energía (Histograma de

Energías). Un estudio posterior del tema permite determinar que esta Densidad o

Distribución de Energías de los electrones se relaciona con las siguientes dos magnitudes físicas:

1. El número de estados cuánticos que el sólido le permite ocupar a los electrones.
2. La probabilidad de que un electrón ocupe esos estados cuánticos. Como los electrones tienen spin semi-entero ( $s = \frac{1}{2}$ ), dicha probabilidad corresponde con una distribución de Fermi-Dirac.

En la Figura 8.3 vemos un gráfico cualitativo de la Distribución  $\rho$  en función de la Energía, para dos temperaturas del sólido 0 K (línea continua) y 1000 K (línea punteada):

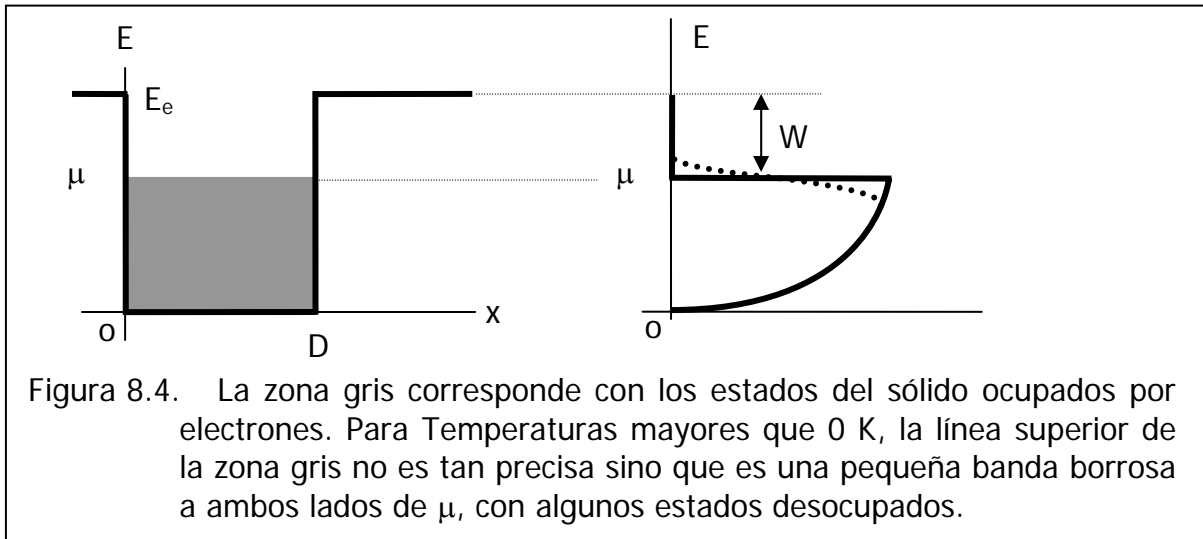


De la anterior Figura vemos que para  $T = 0$  K la máxima energía que puede tener un electrón dentro del sólido es  $E_F$ , llamada Nivel de energía de Fermi, y su valor es una constante característica de cada metal. Para Temperaturas mayores la distribución está determinada por el valor de la variable  $\mu$  llamada Potencial Químico y su valor depende de la Temperatura, además, el Potencial Químico a cero Kelvin es igual al Nivel de Fermi. Para metales a Temperaturas cercanas a la ambiente  $\mu \approx E_F$ .

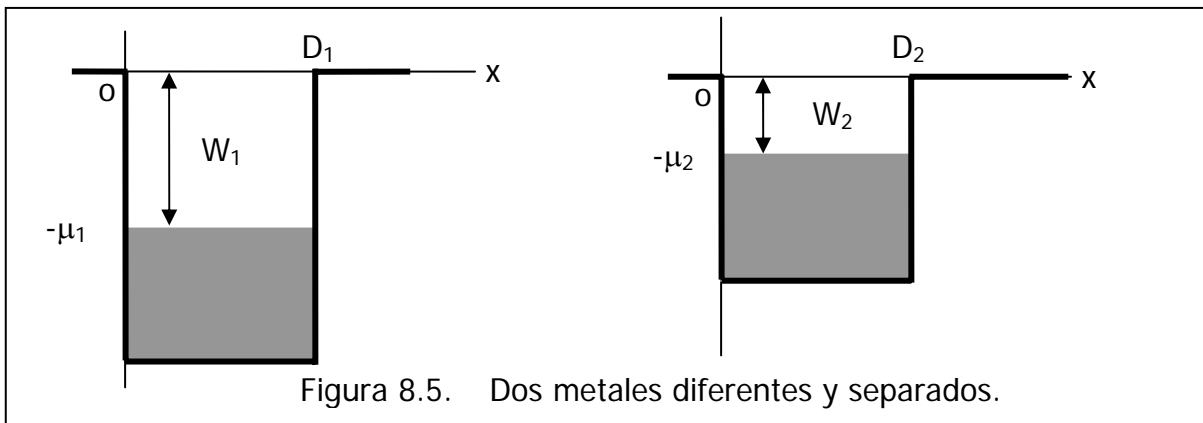
Al analizar en conjunto ambas figuras, como se presenta en la siguiente Figura 8.4, vemos que a 0 K, los electrones de mayor energía ( $E_F$ ), necesitan una energía  $W = E_e - E_F$ , para escapar del sólido. Para Temperaturas mayores que 0 K, la energía de

LA TERMOCUPLA

escape es  $W = E_e - \mu$ . Esta energía de escape se conoce como "Función Trabajo" del material. Los electrones pueden obtener esa Energía de escape al aumentar mucho la Temperatura del sólido en la llamada Emisión Termoiónica de electrones o absorbiendo fotones de suficiente energía en el llamado Efecto Fotoeléctrico.

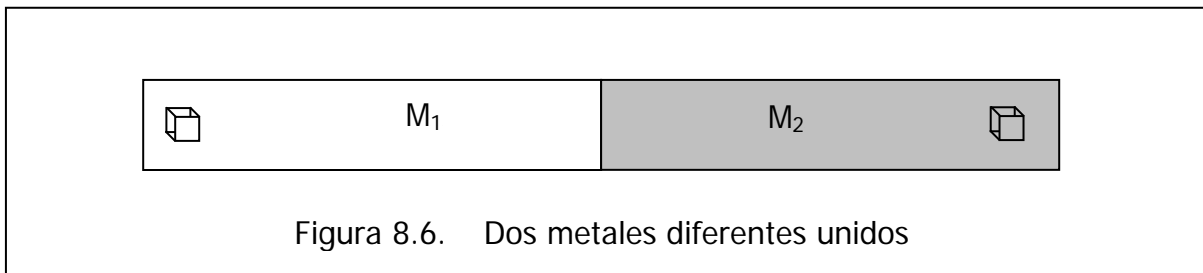


A continuación, consideremos dos metales diferentes, cada uno con su respectiva longitud, Potencial Químico y Función Trabajo, como se indica en la Figura 8.5:

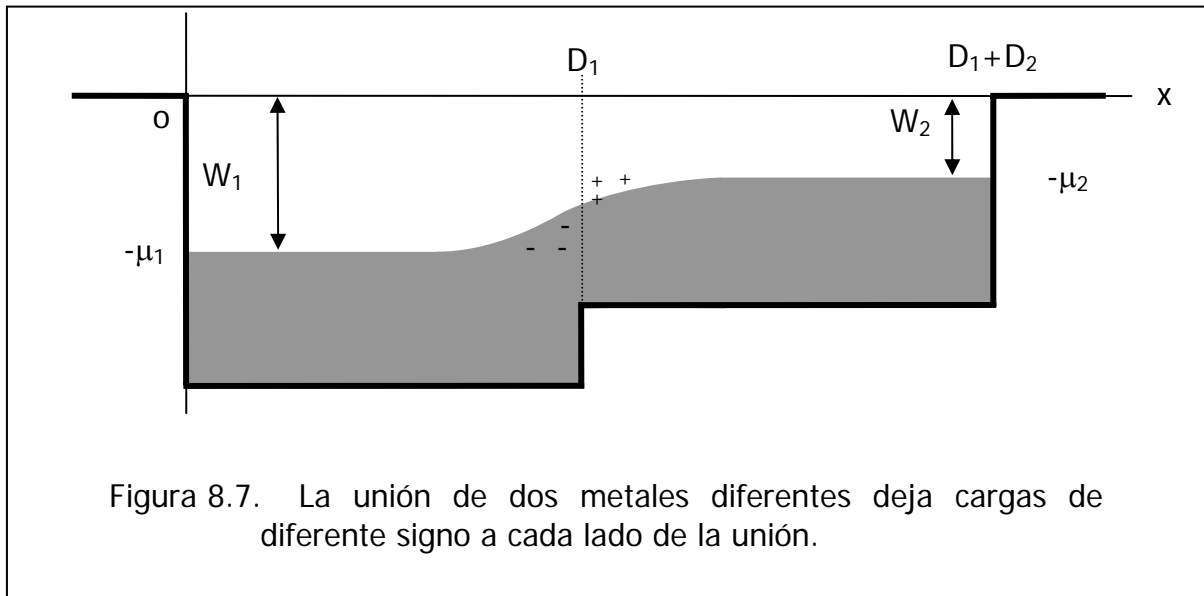


Para unir los dos metales debemos tomar en cuenta que un electrón que salga de un metal ( electrón libre ) es indistinguible de un electrón que salga del otro, por lo tanto el nivel de referencia común para ambos metales debemos fijarlo en el borde superior de los pozos de potencial, como se indicó en la Figura 8.5. Es decir, el trabajo para traer un electrón libre desde el infinito hasta cada metal debe ser cero para ambos metales.

En la Figura 8.6 vemos que los pequeños elementos de volumen que están muy separados de la unión no son afectados por esta y así cada uno tiene sus respectivas distribuciones energéticas por separado, como fueron indicadas en la anterior Figura 8.5, pero para los electrones cercanos a la unión, la diferencia de distribuciones hace que los electrones del metal con menor Potencial Químico consigan en el otro metal estados con menor energía y proceden a ocuparlos, y como los metales eran eléctricamente neutros, los electrones se mueven dejando atrás una carga positiva. Esta difusión de electrones continúa hasta que la atracción de las cargas positivas la balancea, obteniéndose finalmente un equilibrio, en el cual el Potencial Químico es continuo en la unión.



En otras palabras, una discontinuidad en el Potencial Químico indica que los electrones a un lado de la discontinuidad tienen mayor energía promedio que al otro lado y por lo tanto se produce una difusión neta de electrones hasta que los Potenciales Químicos se igualan, de esta manera, un lado de la unión queda cargado negativamente y el otro positivamente, como se indica en la Figura 8.7:



De aquí vemos que se forma una Diferencia de Potencial de Contacto  $V_C$  determinada por la expresión:

$$e V_C = \mu_1 - \mu_2,$$

siendo  $e$  la carga del electrón. Para metales a temperaturas cercanas a la Temperatura ambiente el Potencial de Contacto es prácticamente la diferencia entre los Niveles de Fermi dividida entre la carga del electrón y adicionalmente varía muy poco con la Temperatura de la unión.

### Los Voltajes de Thomson.

Cualquier metal solo, cuyos extremos se encuentran a diferente Temperatura desarrolla una diferencia de potencial entre sus extremos que depende de dicha diferencia de Temperaturas.

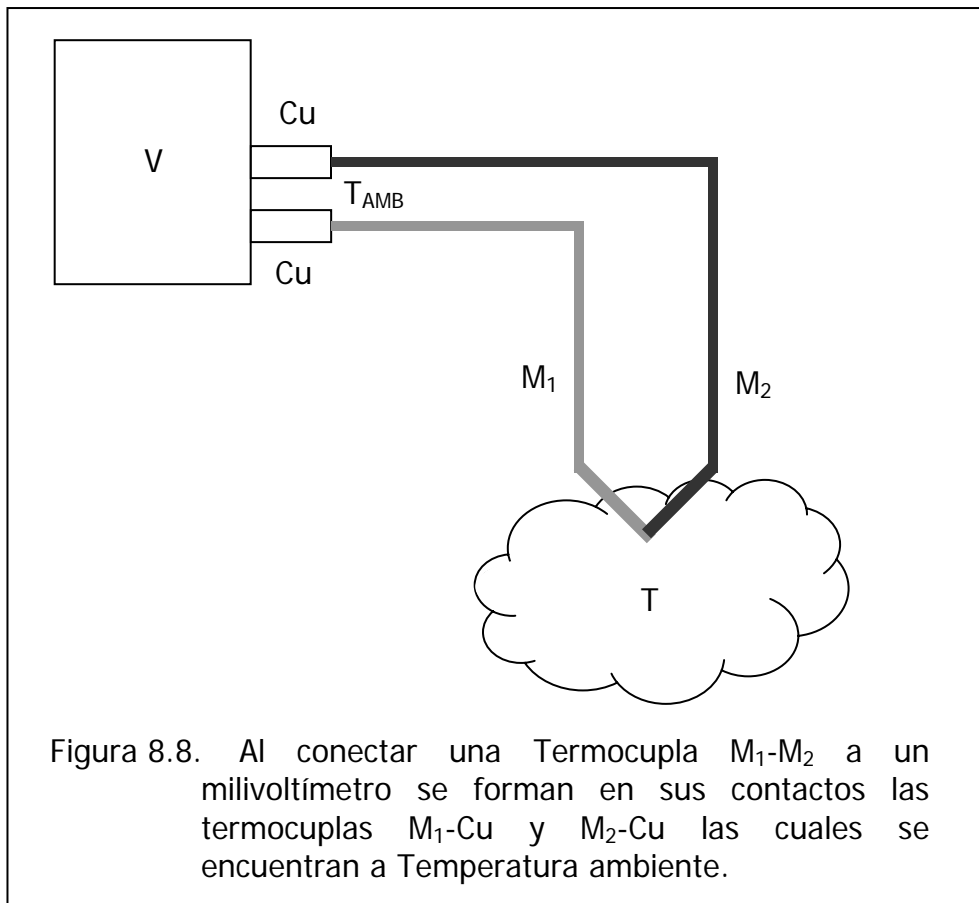
Así, en la Termocupla de la Figura 8.1 el metal 1 producirá un Voltaje de Thomson  $V_1 [ T_{AMB} \rightarrow T ]$ , donde el subíndice indica el metal y la cantidad entre corchetes representa las Temperaturas respectivas [desde  $\rightarrow$  hasta] donde se mide la diferencia de potencial. De la misma manera el metal 2 producirá  $V_2 [ T_{AMB} \rightarrow T ]$ . Por lo tanto, entre los extremos libres de la Termocupla se medirá una diferencia de potencial de Thomson, sin tomar en cuenta el Potencial de Contacto:

$$V_{TH} = V_2 [ T_{AMB} \rightarrow T ] - V_1 [ T_{AMB} \rightarrow T ]$$

Usualmente el cambio del Voltaje de Thomson con la Temperatura es más importante que el del Potencial de Contacto, y así el Efecto Thomson determina mayormente el comportamiento de las Termocuplas.

Montaje para eliminar el efecto de las Variaciones de la Temperatura Ambiente.

Para usar una Termocupla como Termómetro se conecta a un milivoltímetro, como se indica en la siguiente Figura 8.8, donde hemos supuesto, sin pérdida de generalidad, que el metal de conexión del milivoltímetro es cobre:

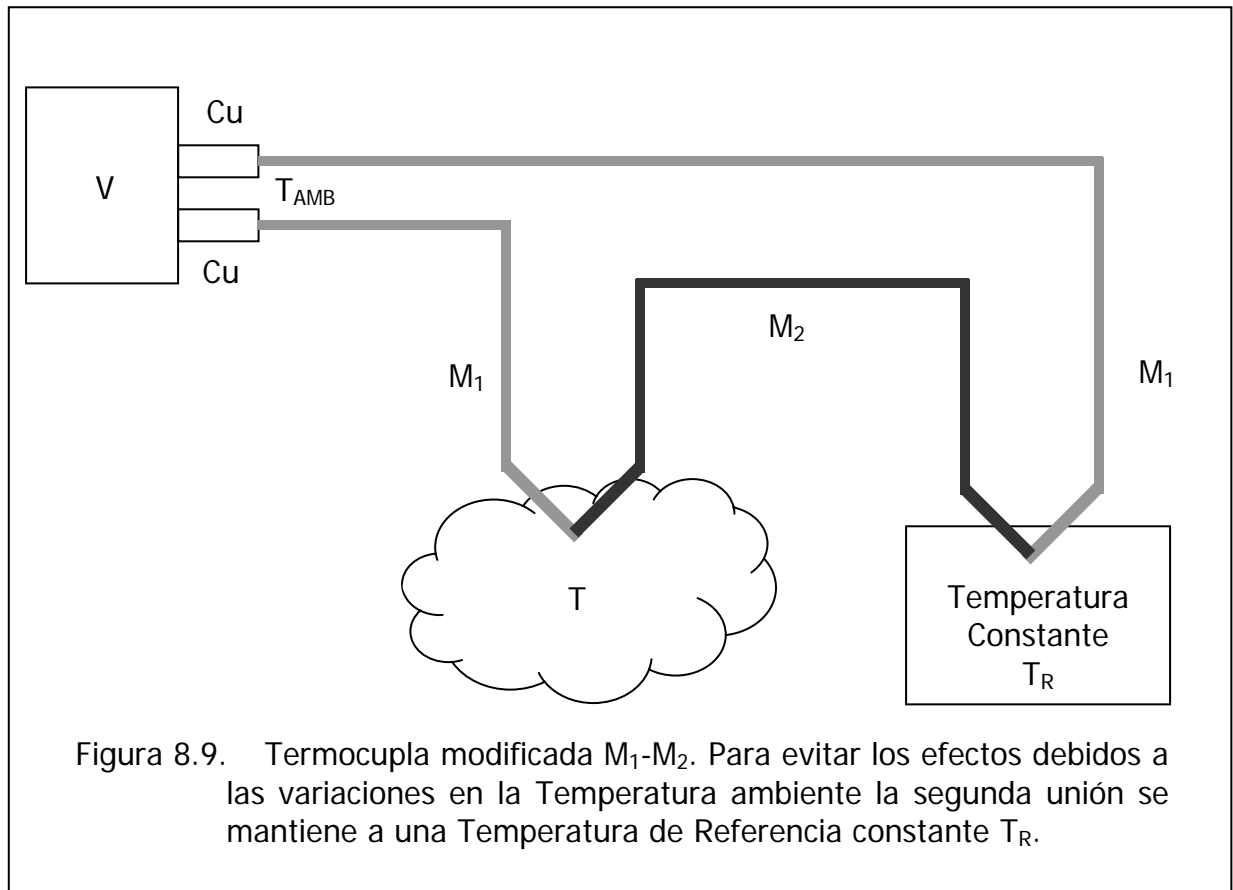


Las Termocuplas parásitas  $M_1$ -Cu y  $M_2$ -Cu se encuentran a Temperatura ambiente y cada una de ellas esta produciendo su propio Potencial de Contacto parásito.

LA TERMOCUPLA

Si la Temperatura ambiente cambia, como suele hacerlo, cada Termocupla parásita cambiará su potencial de contacto de manera distinta, produciéndose una diferencia de potencial parásita que variará al cambiar la Temperatura ambiente.

Para evitar esto, se modifica ligeramente el montaje de forma tal que los contactos en el milivoltímetro sean siempre entre cobre y el mismo tipo de metal  $M_1$ , como se presenta en la siguiente Figura 8.9, de esta manera nos aseguramos que los cambios de potencial producidos por variaciones de la Temperatura ambiente sean iguales en los dos contactos de cobre y como el milivoltímetro siempre mide diferencias de potencial, nunca aparecerán potenciales parásitos al cambiar la Temperatura Ambiente.



La segunda Termocupla se mantiene siempre a temperatura constante, por ejemplo, sumergiéndola en un baño de agua con hielo, en el cual las fases líquida y

LA TERMOCUPLA

sólida coexisten en equilibrio, manteniendo constante la temperatura cerca de 0 °C para presiones cercanas a una atmósfera.

El mismo montaje de la Figura 8.9 sirve para evitar las variaciones en los Voltajes de Thomson debidas a los cambios de la Temperatura Ambiente. En efecto, el Voltaje de Thomson del arreglo de la figura 8.9 será:

$$V_{TH} = \mathbf{V}_1 [ T_{AMB} \rightarrow T ] + \mathbf{V}_2 [ T \rightarrow T_R ] + \mathbf{V}_1 [ T_R \rightarrow T_{AMB} ].$$

El primer sumando puede descomponerse como suma de dos Voltajes. Esta descomposición es llamada la "Ley de las Temperaturas Intermedias":

$$\mathbf{V}_1 [ T_{AMB} \rightarrow T ] = \mathbf{V}_1 [ T_{AMB} \rightarrow T_R ] + \mathbf{V}_1 [ T_R \rightarrow T ],$$

O:

$$\mathbf{V}_1 [ T_{AMB} \rightarrow T ] = \mathbf{V}_1 [ T_R \rightarrow T ] - \mathbf{V}_1 [ T_R \rightarrow T_{AMB} ], \text{ con lo cual:}$$

$$V_{TH} = \mathbf{V}_1 [ T_R \rightarrow T ] + \mathbf{V}_2 [ T \rightarrow T_R ] = \mathbf{V}_2 [ T \rightarrow T_R ] - \mathbf{V}_1 [ T \rightarrow T_R ].$$

De esta manera vemos que el Voltaje de Thomson medido con el montaje de la Figura 8.9 tampoco depende de la Temperatura Ambiente.

Medición del Potencial de Contacto.

Para medir el Potencial de contacto mantenemos los dos extremos de la termocupla a Temperatura Ambiente ya que así su Voltaje de Thomson es cero y por lo tanto el Voltaje Seebeck es igual al Potencial de Contacto.

Montaje con solo una Termocupla.

Existen ocho tipos diferentes de Termocuplas "standard", identificadas cada una por una letra diferente del alfabeto. Por ejemplo en la Termocupla J un metal es Hierro y el otro es una aleación de Cobre y Níquel, conocida comercialmente como Constantan. Aproximadamente cinco tipos más no standard se usan en otras aplicaciones específicas. Para cada Termocupla se consigue del fabricante una tabla que indica el voltaje generado en función de la Temperatura, suponiendo que la segunda unión de la Figura 8.9 está a una Temperatura de referencia de 0 °C. Actualmente no es práctico mantener un baño térmico a 0 °C, y se reemplaza por un sistema corrector que mide aparte la Temperatura ambiente y genera un voltaje corrector de acuerdo con la tabla

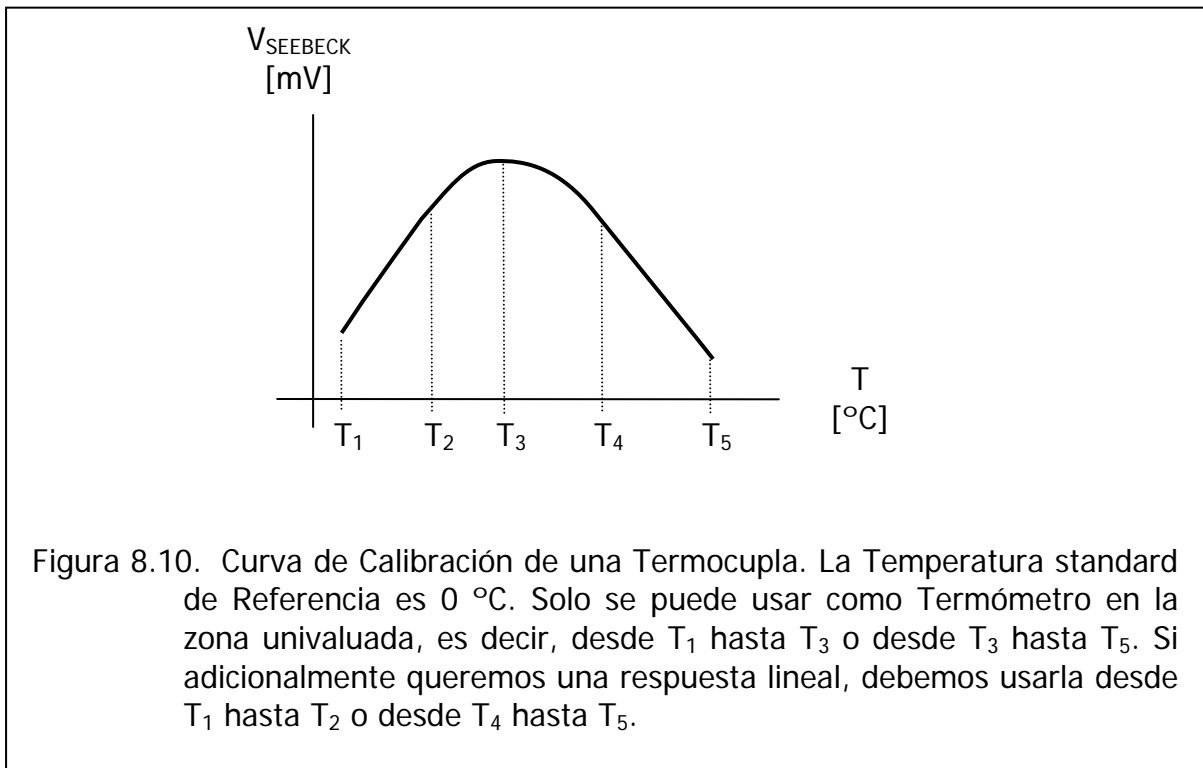
LA TERMOCUPLA

anteriormente mencionada. La corrección puede ser efectuada eléctricamente (hardware: específico para el tipo de Termocupla usada) o matemáticamente (software: Adaptable a los diferentes tipos de Termocuplas).

En el Laboratorio usaremos una sola Termocupla ya que son relativamente pequeñas las variaciones en la Temperatura ambiente durante el desarrollo de la práctica.

Termómetros de Termocupla.

Para usar una termocupla como Termómetro es necesario construir una tabla o gráfica de calibración, midiendo el Voltaje de Seebeck generado para diferentes Temperaturas de la Termocupla. Para un rango muy amplio de temperaturas, dicho grafico se comportará como indica la Figura 8.10:



Las Termocuplas producen una señal de salida relativamente pequeña, con una alta resistencia de salida, por lo que se necesitan milivoltímetros de alta impedancia de entrada para medir la señal, lo cual no es una restricción fuerte porque estos

LA TERMOCUPLA

milivoltímetros son comunes ahora. Los bajos niveles de la señal demandan minimizar las posibles fuentes de ruido inducido, como motores, cables de potencia y transformadores. En general para Temperaturas mayores a 1000 °C se deben proteger los metales de los efectos corrosivos del ambiente.

**Pre-Laboratorio**

1. Elabore en un solo Mapa Conceptual los temas y procedimientos experimentales de esta práctica para ser evaluado como parte del quiz inicial.
2. ¿Qué quiere decir que una termocupla se calibró?
3. ¿Qué es el Voltaje de Seebeck?
4. ¿Qué es el Potencial de Contacto?
5. ¿Qué es el Potencial de Thomson?
6. ¿Qué es el Potencial químico?
7. ¿Qué es el Nivel de Fermi?
8. Diseñe un circuito equivalente de una termocupla con un voltaje que depende de la temperatura  $V_T(T)$  y una resistencia interna muy grande  $R_T$ .
9. ¿Por qué la termocupla de la Figura 8.10 no sirve desde  $T_2$  hasta  $T_4$ ?
10. ¿Sirve desde  $T_1$  hasta  $T_5$ ? ¿Por qué?
11. ¿Sirve desde  $T_1$  hasta  $T_3$ ? ¿Por qué?
12. Demuestre la “Ley de los Metales Intermedios” contestando las siguientes dos preguntas:
  - a. ¿Por qué, si se usa un tercer metal entre un extremo de la Termocupla y el contacto de cobre del voltímetro, manteniendo todo el tercer metal a Temperatura Ambiente, no se desarrollan nuevos valores del Voltaje de Thomson total?
  - b. ¿Por qué, si se usa un tercer metal entre un extremo de la Termocupla y el contacto de cobre del voltímetro, manteniendo todo el tercer metal a Temperatura Ambiente, no se desarrollan nuevos valores del Potencial de Contacto total?
13. Una termocupla “Homogénea” se construye con dos pedazos de metales iguales. Suponiendo que en la Figura 8.1 el metal 1 es igual al metal 2, demuestre que no

LA TERMOCUPLA

se genera ningún Voltaje Seebeck. Este hecho se conoce como la "Ley del Circuito Homogéneo".

14. ¿Qué pasa si en su camino hasta el milivoltímetro, y en una zona a Temperatura ambiente se cortocircuitan los dos metales que vienen de la Termocupla, por culpa de un defecto en su aislamiento?
15. ¿Qué pasa con el Voltaje de Seebeck si se conectan dos Termocuplas iguales en Serie?
16. ¿Qué pasa con el Voltaje de Seebeck si se conectan dos Termocuplas iguales en Paralelo?

**Procedimiento Experimental**

Sección:

Fecha:

Integrantes:

**Objetivos:**

- Calibrar las termocuplas del laboratorio.
- Usar una termocupla calibrada para medir la temperatura.

**Actividad Nº 1. Potencial de Contacto.**

Manteniendo todo el Sistema a la Temperatura ambiente inicial conecte el milivoltímetro a la Termocupla sola.

Lea en el Termómetro la Temperatura ambiente:

$T_{\text{AMBIENTE}}$		$^{\circ}\text{C}$
-----------------------	--	--------------------

Encienda el milivoltímetro y Lea los Potenciales de Contacto:

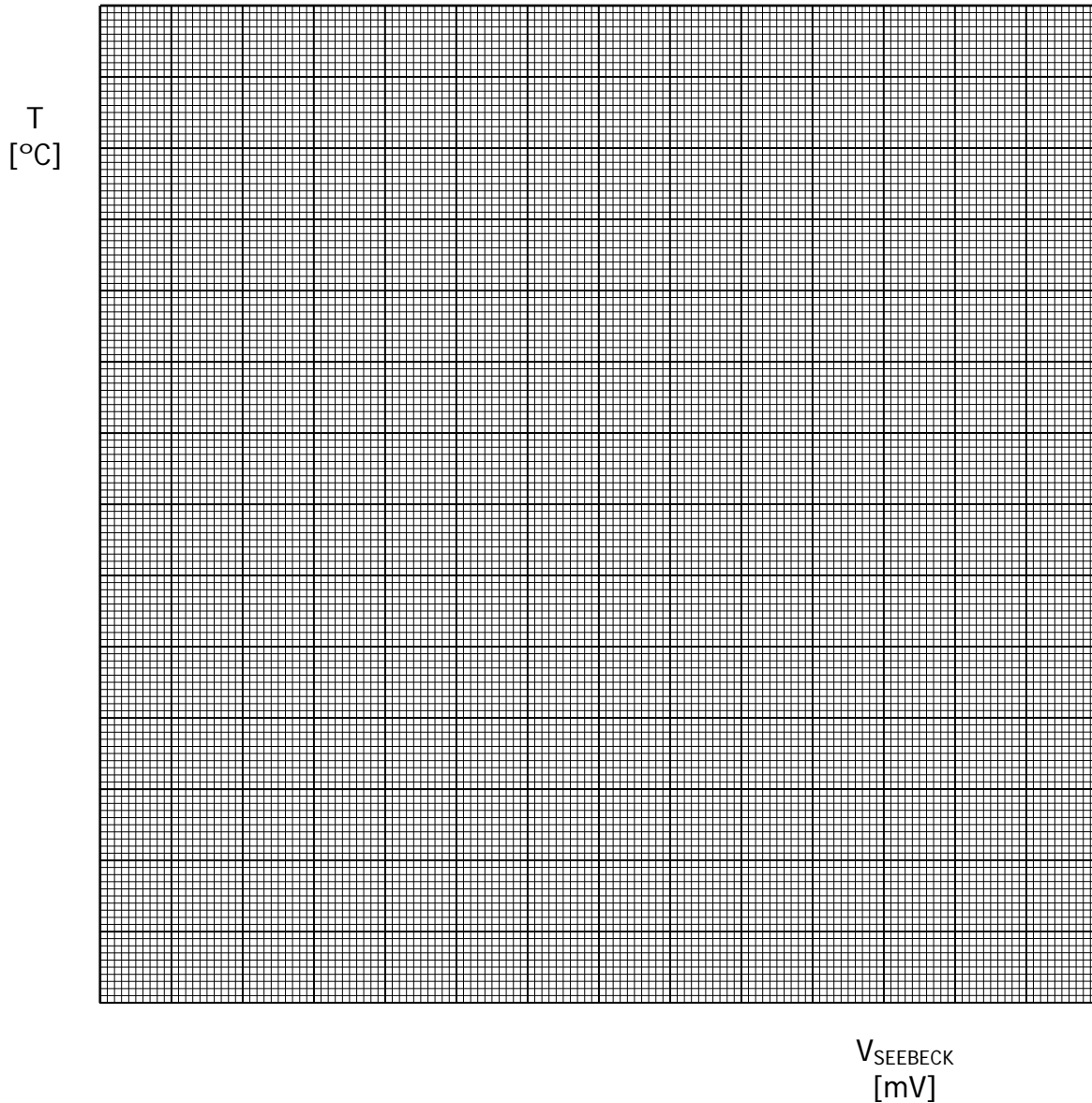
Potenciales de Contacto a Temperatura Ambiente		
Una Termocupla sola		mV
Dos Termocuplas en serie		mV
Dos Termocuplas en paralelo		mV

**Actividad Nº 2. Calibración de las Termocuplas.**

Introduzca las Termocuplas en el Baño Térmico. Aplique una revolución moderada al imán agitador y complete la siguiente Tabla de Calibración, tomando un valor del Voltaje de Seebeck por cada década de grado Celsius.

Temperatura °C	TERMOCUPLA [ mV ]		
	Sola	Serie	Paralelo

Grafique las tres curvas de calibración en el siguiente recuadro, identificando cada una de ellas:



### Actividad Nº 3. Potencial de Contacto.

Saque las Termocuplas y el Termómetro del Baño Térmico y espere 10 minutos hasta que todo el sistema esté a la nueva Temperatura Ambiente.

Lea en el Termómetro la nueva Temperatura ambiente:

$T_{\text{AMBIENTE}}$		°C
-----------------------	--	----

Lea los nuevos Potenciales de Contacto:

Potenciales de Contacto a Temperatura Ambiente		
Una Termocupla sola		mV
Dos Termocuplas en serie		mV
Dos Termocuplas en paralelo		mV

Compare y comente las Actividades números uno y tres:

--

**Actividad Nº 4. Medición de una Temperatura.**

Use la Termocupla sola como un Termómetro. Para ello, estando la Termocupla a Temperatura Ambiente, tome **con suavidad** el extremo de la Termocupla, rodeándola con la mano y después que se obtenga el equilibrio Térmico, lea el Voltaje de Seebeck que genera su cuerpo:

$V_{\text{SEEBECK}}$		mV
----------------------	--	----

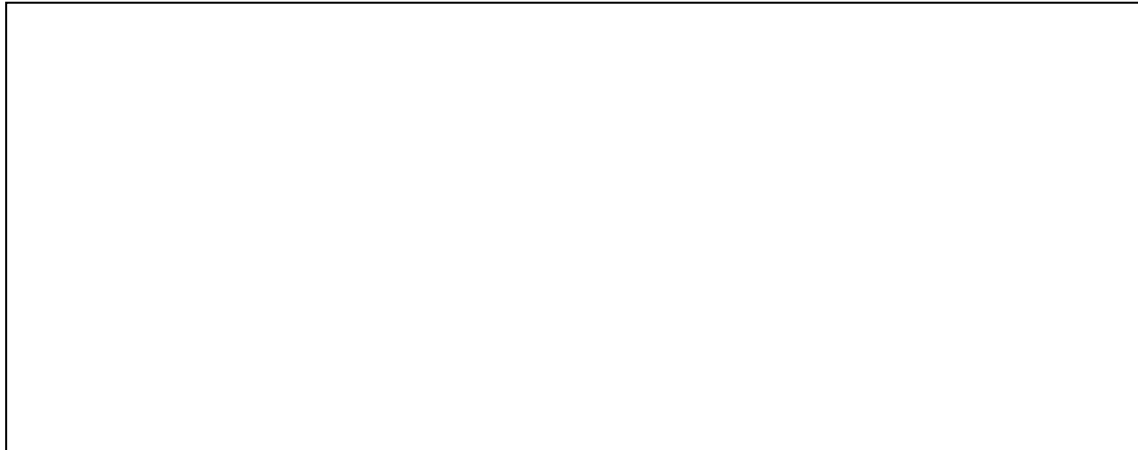
Use la Curva de Calibración para la Termocupla sola y convierta el anterior valor de milivoltios a grados Celsius:

$T_{\text{CUERPO}}$		°C
---------------------	--	----

Haga las conclusiones finales de la práctica:

**Cierre Cognitivo**

Elabore una lista de los conceptos y/o palabras claves más importantes de la práctica:



Indique como cree que puede mejorarse el texto, los experimentos, la evaluación o cualquier otro aspecto relacionado con el aprendizaje de la práctica (opcional):

