

I.- Introducción

1.1-Introducción a la Termoelectricidad.

La **termoelectricidad** se considera como la rama de la termodinámica superpuesta a la electricidad donde se estudian fenómenos en los que intervienen el calor y la electricidad, el fenómeno más conocido es el de electricidad generada por la aplicación de calor a la unión de dos materiales diferentes. Si se unen por ambos extremos dos alambres de distinto material (este circuito se denomina termopar), y una de las uniones se mantiene a una temperatura superior a la otra, surge una diferencia de tensión que hace fluir una corriente eléctrica entre las uniones caliente y fría. Este fenómeno fue observado por primera vez en 1821 por el físico alemán **Thomas Seebeck**, y se conoce como efecto *Seebeck*.

Para una pareja de materiales determinada, la diferencia de tensión es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas. Esta relación puede emplearse para la medida precisa de temperaturas mediante un termopar en el que una de las uniones se mantiene a una temperatura de referencia conocida (por ejemplo, un baño de hielo) y la otra se coloca en el lugar cuya temperatura quiere medirse. A temperaturas moderadas (hasta unos 260 °C) suelen emplearse combinaciones de hierro y cobre, hierro y constantan (una aleación de cobre y níquel), y cobre y constantan. A temperaturas mayores (hasta unos 1.650 °C) se utiliza platino y una aleación de platino y rodio. Como los alambres de los termopares pueden tener dimensiones muy pequeñas, también permiten medir con precisión las temperaturas locales en un punto. La corriente generada puede aumentarse empleando semiconductores en lugar de metales, y puede alcanzarse una potencia de unos pocos vatios con eficiencias de hasta el 6%. Estos generadores termoeléctricos, calentados con quemadores de queroseno, son muy utilizados en zonas remotas de Rusia para alimentar receptores de radio.

Cuando se hace pasar una corriente por un circuito compuesto de materiales distintos cuyas uniones están a la misma temperatura, se produce el efecto inverso. En este caso, se absorbe calor en una unión y se desprende en la otra. Este fenómeno se conoce como efecto *Peltier*, en honor al físico francés **Jean Peltier** quien lo descubrió en 1834. Es posible usar sistemas de semiconductores basados en el efecto *Peltier* como refrigeradores para aplicaciones especiales.

Aunque se considera como descubridor del efecto termoeléctrico a **Seebeck**, al revisar los estudios de **A. Volta** se ha constatado que en sus trabajos pioneros sobre electricidad midió diferencias de potencial debidas a la termoelectricidad al usar contactos entre diversos metales, sin embargo no prestó demasiada atención a dicho efecto.

NOTA HISTÓRICA

Volta, Alessandro (1745-1827), fue conde además de físico italiano, conocido por sus trabajos sobre la electricidad. Nació en Como y estudió allí, en la escuela pública. En 1774 fue profesor de física en la Escuela Regia de Como y al año siguiente inventó el electróforo, un instrumento que producía cargas eléctricas. Durante 1776 y 1777 se dedicó a la química, estudió la electricidad atmosférica e ideó experimentos como la ignición de gases mediante una chispa eléctrica en un recipiente cerrado. En 1779 fue profesor de física en la Universidad de Pavia, cátedra que ocupó durante 25 años. Hacia 1800 había desarrollado la llamada pila de Volta, precursora de la batería eléctrica, que producía un flujo estable de electricidad. Por su trabajo en el campo de la electricidad, Napoleón le nombró conde en 1801. La unidad eléctrica conocida como voltio recibió ese nombre en su honor. La primera teoría que engloba los efectos *Seebeck* y *Peltier*, sin embargo, fue dada por **Lord Kelvin**, de nombre William Thomson, a mediados del siglo XIX.

NOTA HISTÓRICA

Kelvin, Lord o Thomson, William (1824-1907) fue un matemático y físico británico, y uno de los principales físicos y más importantes profesores de su época. Nació en Belfast el 26 de junio de 1824, estudió en las universidades de Glasgow y Cambridge. Desde 1846 hasta 1899 fue profesor de la Universidad de Glasgow.

En el campo de la termodinámica **Kelvin** desarrolló el trabajo realizado por James Prescott **Joule** sobre la interrelación del calor y la

energía mecánica, y en 1852 ambos colaboraron para investigar el fenómeno al que se conoció como efecto **Joule-Thomson**. En 1848 **Kelvin** estableció la escala absoluta de temperatura que sigue llevando su nombre. Su trabajo en el campo de la electricidad tuvo aplicación en la telegrafía. Estudió la teoría matemática de la electrostática, llevó a cabo mejoras en la fabricación de cables e inventó el galvanómetro de imán móvil y el sifón registrador. Ejerció como asesor científico en el tendido de cables telegráficos del Atlántico en 1857, 1858, 1865 y 1866. **Kelvin** también contribuyó a la teoría de la elasticidad e investigó los circuitos oscilantes, las propiedades electrodinámicas de los metales y el tratamiento matemático del magnetismo. Junto con el fisiólogo y físico alemán Hermann Ludwig von Helmholtz, hizo una estimación de la edad del Sol y calculó la energía irradiada desde su superficie. Entre los aparatos que inventó o mejoró se encuentran un dispositivo para predecir mareas, un analizador armónico y un aparato para grabar sonidos en aguas más o menos profundas. También mejoró aspectos de la brújula marina o compás náutico.

Muchas de sus obras científicas se recopilaron en su *Ponencias sobre electricidad y magnetismo* (1872), *Ponencias matemáticas y físicas* (1882, 1883, 1890) y *Cursos y conferencias* (1889-1894). **Kelvin** fue presidente de la Sociedad Real de Londres en 1890, y en 1902 recibió la Orden del Mérito. Murió el 17 de diciembre de 1907.

El enfriamiento termoelectrónico empezó a ser factible a partir de los estudios de Telkes en los años 30 y de Ioffee, quien publicó un excelente libro en 1956, Los nuevos materiales semiconductores irrumpían en la escena produciendo rendimientos mucho más altos. Telkes utilizó pares o soldaduras de PbS y ZnSb y Ioffee descubrió el uso de PbTe y PbSe. Los Telluros y Seleniuros han sido muy utilizados, y para conversión de energía calorífica en eléctrica se alcanzan rendimientos aceptables.

1.2-Definiciones y conceptos básicos

En este apartado se describirán aquellos términos, definiciones y conceptos básicos que se utilizarán a lo largo de este libro.

Refrigeración

Refrigeración, es el proceso en el que se reduce la temperatura de un espacio determinado y se mantiene esta temperatura baja con el fin, por ejemplo, de enfriar alimentos, conservar determinadas sustancias o conseguir un ambiente agradable. El almacenamiento refrigerado de alimentos perecederos, pieles, productos farmacéuticos y otros se conoce como almacenamiento en frío. La refrigeración evita el crecimiento de bacterias e impide algunas reacciones químicas no deseadas que pueden tener lugar a temperatura ambiente.

El uso de hielo de origen natural o artificial como refrigerante estaba muy extendido hasta poco antes de la Primera Guerra Mundial, cuando aparecieron los refrigeradores mecánicos y eléctricos. La eficacia del hielo como refrigerante es debida a que tiene una temperatura de fusión de 0 °C y para fundirse debe absorber una cantidad de calor equivalente a 333,1 kJ/kg. La presencia de una sal en el hielo reduce en varios grados el punto de fusión del mismo. Los alimentos que se mantienen a esta temperatura o ligeramente por encima de ella pueden conservarse en buen estado durante más tiempo. El dióxido de carbono sólido, conocido como hielo seco o nieve carbónica, también se usa como refrigerante. A presión atmosférica normal no tiene fase líquida, y sublima directamente de la fase sólida a la gaseosa a una temperatura de -78,5 °C. La nieve carbónica es eficaz para conservar productos a bajas temperaturas mientras dura su sublimación.

En la refrigeración mecánica se obtiene un enfriamiento constante mediante la circulación de un refrigerante en un circuito cerrado, donde se evapora y se vuelve a condensar en un ciclo continuo. Si no existen pérdidas, el refrigerante sirve para toda la vida útil del sistema. Todo lo que se necesita para mantener el enfriamiento es un suministro continuo de energía y un método para disipar el calor. Los dos tipos principales de sistemas mecánicos de refrigeración son el sistema de compresión empleado en los refrigeradores domésticos grandes y en la mayoría de los aparatos de aire acondicionado, y el sistema de absorción, que en la actualidad se usa sobre todo en los acondicionadores de aire por calor, aunque en el pasado también se empleaba en refrigeradores domésticos por calor.

Sistemas de compresión

Los sistemas de compresión emplean cuatro elementos en el ciclo de refrigeración: compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador. En el evaporador, el refrigerante se evapora y absorbe calor del espacio que está enfriando y de su contenido. A continuación, el vapor pasa a un compresor movido por un motor que incrementa su presión, lo que aumenta su temperatura. El gas sobrecalentado a alta presión se transforma posteriormente en líquido en un condensador refrigerado por aire o agua. Después del condensador, el líquido pasa por una válvula de expansión, donde su presión y temperatura se reducen hasta alcanzar las condiciones que existen en el evaporador.

Refrigerantes

Para cada refrigerante existe una temperatura específica de vaporización asociada con cada presión, por lo que basta controlar la presión del evaporador para obtener la temperatura deseada. En el condensador existe una relación similar entre la presión y la temperatura. Durante muchos años, uno de los refrigerantes más utilizados fue el diclorodifluorometano, conocido como refrigerante-12. Este compuesto clorofluorocarbonado (CFC) sintético se transformaba en vapor a -6, °C a una presión de 246,2 kPa (kilopascales), y después de

comprimirse a 909,2 kPa se condensaba a 37,8 °C.

En los refrigeradores pequeños empleados en las viviendas para almacenar comida, el calor del condensador se disipa a la habitación donde se sitúa. En los acondicionadores de aire, el calor del condensador debe disiparse al exterior o directamente al agua de refrigeración.

En un sistema doméstico de refrigeración, el evaporador siempre se sitúa en un espacio aislado térmicamente. A veces, este espacio constituye todo el refrigerador. El compresor suele tener una capacidad excesiva, de forma que si funcionara continuamente produciría temperaturas más bajas de las deseadas. Para mantener el refrigerador a la temperatura adecuada, el motor que impulsa el compresor está controlado por un termostato o regulador.

Los congeladores para alimentos ultracongelados son similares a los anteriores, sólo que su compresor y motor tienen que tener la potencia y tamaño suficientes para manejar un mayor volumen de refrigerante con una presión menor en el evaporador. Por ejemplo, para mantener una temperatura de -23,3 °C con refrigerante-12 se necesitaría una presión de 132,3 kPa en el evaporador.

El refrigerante-12 y otros dos CFC, el refrigerante-11 y el refrigerante-22, eran los principales compuestos empleados en los sistemas de enfriamiento y aislamiento de los refrigeradores domésticos. Sin embargo, se ha descubierto que los CFC suponen una grave amenaza para el medio ambiente del planeta por su papel en la destrucción de la capa de ozono. Según el Protocolo de Montreal, la fabricación de CFC debía finalizar al final de 1995. Los hidroclorofluorocarbonos, HCFC, y el metilbromuro no dañan la capa de ozono pero producen gases de efecto invernadero. Los HCFC se retirarán en el 2015 y el consumo de metilbromuro se limitará en un 25% en 1998. La industria de la refrigeración debería adoptar rápidamente otros compuestos alternativos no perjudiciales, como el metilcloroformo.

Sistemas de absorción

Algunos refrigeradores domésticos funcionan mediante el principio de absorción. En ellos, una llama de gas calienta una disolución concentrada de amoníaco en agua en un recipiente llamado generador, y el amoníaco se desprende en forma de vapor y pasa a un condensador. Allí se licúa y fluye hacia el evaporador, igual que en el sistema de compresión. Sin embargo, en lugar de pasar a un compresor al salir del evaporador, el amoníaco gaseoso se reabsorbe en la disolución diluida y parcialmente enfriada procedente del generador, para formar de nuevo una disolución concentrada de amoníaco. Este proceso de reabsorción se produce en un recipiente llamado absorbedor, desde donde el líquido concentrado fluye de vuelta al generador para completar el ciclo.

La refrigeración por absorción se usa cada vez más en refrigeradores para acondicionar el aire, en los que resultan adecuadas temperaturas de refrigerante entre 7 y 10 °C aproximadamente. En este rango de temperaturas puede emplearse agua como refrigerante, y una disolución acuosa de alguna sal, generalmente bromuro de litio, como material absorbente. El agua hierve a una temperatura muy baja en el evaporador porque la presión allí es muy reducida. El vapor frío se absorbe en la disolución salina concentrada. Después, esta disolución se bombea al generador donde, a temperatura elevada, se hace hervir el agua sobrante para aumentar la concentración de sal en la disolución; ésta, después de enfriarse, circula de vuelta al absorbedor para completar el ciclo. El sistema funciona con un vacío elevado: la presión del evaporador es aproximadamente de 1 kPa, y el generador y el condensador están a unos 10 kPa. Generalmente, estas unidades se calientan con llama directa o utilizan vapor generado en una caldera.

Unidades eléctricas

Las unidades se emplean para medir cuantitativamente toda clase de fenómenos electrostáticos y electromagnéticos, así como las características electromagnéticas de los componentes de un circuito eléctrico. Las unidades eléctricas empleadas en técnica y ciencia se definen en el Sistema Internacional de unidades. Sin embargo, se siguen utilizando algunas unidades más antiguas.

Unidades SI

La unidad de intensidad de corriente en el Sistema Internacional de unidades es el *amperio (Amper)*. La unidad de carga eléctrica es el *culombio (Coulomb)*, que es la cantidad de electricidad que pasa en un segundo por cualquier punto de un circuito por el que fluye una corriente de 1 amperio. El *voltio (Volt)* es la unidad SI de diferencia de potencial y se define como la diferencia de potencial que existe entre dos puntos cuando es necesario realizar un trabajo de 1 *julio (Joule)* para mover una carga de 1 culombio de un punto a otro. La unidad de potencia eléctrica es el *vatio (Watt)*, y representa la generación o consumo de 1 julio de energía eléctrica por segundo. Un kilovatio es igual a 1.000 vatios.

Las unidades también tienen las siguientes definiciones prácticas, empleadas para calibrar instrumentos: el amperio es la cantidad de electricidad que deposita 0,001118 gramos de plata por segundo en uno de los electrodos si se hace pasar a través de una solución de nitrato de plata; el voltio es la fuerza electromotriz necesaria para producir una corriente de 1 amperio a través de una resistencia de 1 ohmio, que a su vez se define como la resistencia eléctrica de una columna de mercurio de 106,3 cm de altura y 1 mm² de sección transversal a una temperatura de 0 °C. El voltio también se define a partir de una pila voltaica patrón, la denominada pila de Weston, con polos de amalgama de cadmio y sulfato de mercurio (I) y un electrólito de sulfato de cadmio. El voltio se define como 0,98203 veces el potencial de esta pila patrón a 20 °C.

En todas las unidades eléctricas prácticas se emplean los prefijos convencionales del sistema métrico para indicar fracciones y múltiplos de las unidades básicas. Por ejemplo, un microamperio es una millonésima de amperio, un milivoltio es una milésima de voltio y 1 megaohmio es un millón de ohmios.

Las Dimensiones y unidades características del Sistema Internacional son:

Dimensión	Longitud	Masa	Tiempo	Temperatura	Intensidad	Luz	Materia
Símbolo	L (m)	M (Kg.)	T (s)	O (K)	I (A)	Il(Cd)	--
Unidad	Metro	Kilogramo	Segundo	° Kelvin	Amperio	Candela	Mol

Resistencia, capacidad e inductancia

Todos los componentes de un circuito eléctrico exhiben en mayor o menor medida una cierta resistencia, capacidad e inductancia. La unidad de resistencia comúnmente usada es el *ohmio (Ohm)*, que es la resistencia de un conductor en el que una diferencia de potencial de 1 voltio produce una corriente de 1 amperio. La capacidad de un condensador se mide en faradios: un condensador de 1 *faradio (Farad)* tiene una diferencia de potencial entre sus placas de 1 voltio cuando éstas presentan una carga de 1 culombio. La unidad de inductancia es el *henrio (Henry)*. Una bobina tiene una autoinductancia de 1 henrio cuando un cambio de 1 amperio/segundo en la corriente eléctrica que fluye a través de ella provoca una fuerza electromotriz opuesta de 1 voltio. Un transformador, o dos circuitos cualesquiera magnéticamente acoplados, tienen una inductancia mutua de 1 henrio cuando un cambio de 1 amperio por segundo en la corriente del circuito primario induce una tensión de 1 voltio en el circuito secundario.

1.3-Resumen del libro

La Termoelectricidad es un tema multidisciplinario donde distintas ramas de la Física y la Ingeniería son importantes, en los siguientes temas se desarrollan las bases teóricas y prácticas para entender y poder diseñar sistemas termoelectricos. Se comienza con una introducción básica donde se definen de forma empírica los efectos Seebeck, Peltier y Thompson y se analiza el balance energético local de una placa o elemento termoelectrico.

En el tema 3 se deducen las relaciones de Kelvin a partir de procesos fundamentales de la teoría termodinámica, También se describen los materiales semiconductores que han permitido el desarrollo practico de la termoelectricidad y se dan unas nociones de teoría de estado sólido.

En el tema 5 se describe la forma practica de producir una placa termoelectrica, tanto como generadora de corriente eléctrica (Efecto Seebeck) como para producir un flujo de calor entre sus placas (Efecto Peltier). Se presentan algunos cálculos simplificados útiles para diversas placas existentes. Se da información sobre la forma practica de elegir una placa determinada incluyendo información sobre los fabricantes y modelos de placas, de sistemas termoelectricos de generación eléctrica y de sistemas termoelectricos de refrigeración.

Para abordar el diseño de un sistema termoelectrico complejo, donde se tiene en cuenta el entorno y las condiciones de funcionamiento de las placas termoelectricas es necesario aplicar conjuntamente los principios de la termodinámica, de transferencia térmica y termoelectricos aplicados al sistema elegido para la aplicación. En los temas 9 y 10 se repasan los conceptos básicos y se aplican a radiadores y disipadores térmicos, ya que estos son de importancia fundamental en el correcto diseño de una aplicación termoelectrica. Se explicara como escoger un Elemento Termo Eléctrico (ETE) para una aplicación dada, se expondrán algunos usos científicos y comerciales del enfriamiento mediante elementos termoelectronicos y se darán orientaciones para su aplicación. Finalmente se presentan algunas aplicaciones practicas.

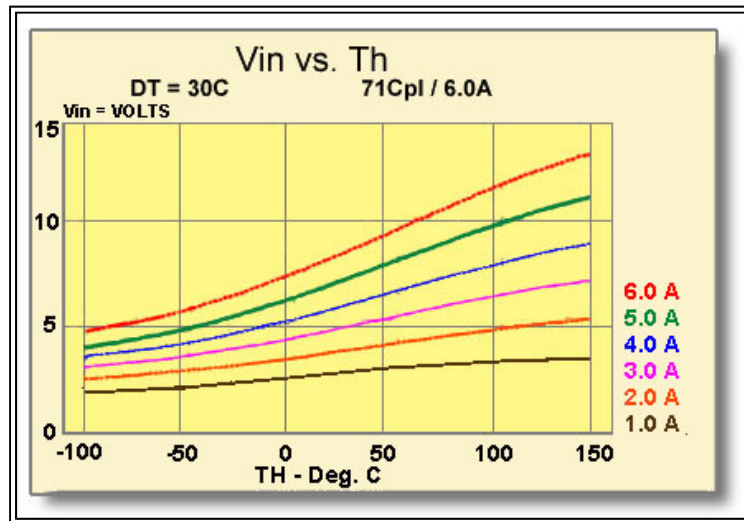
También son importantes las características de la corriente eléctrica y las fuentes de alimentación (Tema 11) así como los procesos de regulación electrónica.

Por ultimo se describen en los temas 12 y 13 diversas aplicaciones, algunas de las cuales ya se aplican en la industria, la investigación o los servicios con una lista de ejemplos de diseño integrado obtenidos por diversas empresas que han implementado esta nueva tecnología.

Para el futuro ingeniero y científico, es importante el estar al día en nuevos avances, así como poder contrastar sus diseños, ideas o teorías con sus colegas. Para ello se presenta en los temas 16 y 17 información sobre conferencias sobre Termoelectricidad así como la información de la Internacional Thermoelectric Society así como de la Asociación Ibérica de Termoelectricidad y una serie de paginas web

II.- Teoría Básica

2.1.-Efectos de la variación de la temperatura en los dispositivos termoelectricos



Variaciones de temperatura

Los dispositivos termoelectricos están sometidos, principalmente, a cuatro efectos fisicos: El efecto Seebeck, el efecto Peltier, el efecto Thomson y el efecto Joule.

El *efecto Seebeck* es la f.e.m. generada cuando dos lados de un modulo termoelectrico se mantienen a distinta temperatura.

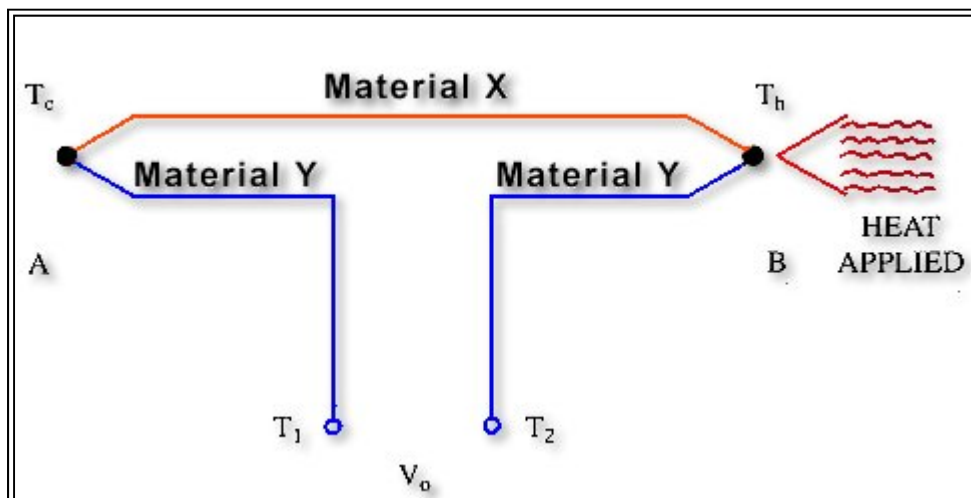
El *efecto Peltier* consiste en el calentamiento o enfriamiento producido cuando una corriente eléctrica pasa a través de dos uniones distintas.

El *efecto Thomson* consiste en el calentamiento o enfriamiento producido cuando una corriente eléctrica pasa a través de un conductor homogéneo en la dirección del gradiente de temperatura.

El *efecto Joule* consiste en el calentamiento producido cuando una corriente eléctrica pasa a través de un conductor.

EL EFECTO SEEBECK

Para explicar el efecto Seebeck utilizaremos un circuito con un simple termopar tal y como se muestra en la figura 2.1a



El termopar esta construido con dos metales diferentes, que en la figura se denominan material X y material Y.

En una aplicación de medida de temperatura el termopar A se utiliza como referencia, por lo que se mantiene a una temperatura T_c . El

termopar B se usa para medir la temperatura de interés T_h , que en este ejemplo será superior a T_c . Con la temperatura a la que se halla sometido el termopar B, aparece una diferencia de potencial entre los puntos T1 y T2 (Salida del termopar). Esta tensión V_o se conoce como f.e.m de Seebeck y se puede expresar como una serie de potencias de la diferencia de temperatura entre el foco caliente, T_h , y el foco frío, T_c :

$$V_{ab} \approx C_1 (T_h - T_c) + \frac{C_2}{2} (T_h - T_c)^2 + \frac{C_3}{3} (T_h - T_c)^3 \quad 2.1)$$

El coeficiente de Seebeck se define en función de la variación del voltaje con la temperatura como:

$$\alpha_{ab} = \frac{\partial V_{ab}}{\partial T_h} = C_1 + C_2 (T_h - T_c) + C_3 (T_h - T_c)^2 \quad 2.2)$$

Las unidades del coeficiente de Seebeck, α , en S.I. son $\{V \text{ over } K\}$.

EL EFECTO PELTIER

Este efecto puede considerarse como el inverso del efecto Seebeck y consiste en que al hacer pasar corriente eléctrica a través de la unión de dos conductores distintos en una determinada dirección produce enfriamiento, y al hacerla pasar en dirección contraria produce calentamiento en la unión. La potencia calorífica generada o absorbida es proporcional a la corriente eléctrica y también depende de la temperatura de la unión y se expresa como:

$$\{ Q \}_p = \pi I \quad 2.3)$$

en donde:

$\{ Q \}_p$ es la potencia calorífica generada o absorbida debido al efecto Peltier.

π es el coeficiente de Peltier.

I es la intensidad de corriente que pasa a través de la unión.

Las unidades del coeficiente de Peltier, π , en S.I. son V .

Por la primera ley de Kelvin tenemos: $\pi = \alpha T \quad 2.4)$

en donde:

α es el coeficiente de Seebeck de dos conductores distintos.

T es la temperatura absoluta en la unión.

Así pues, la ecuación (2.3) puede expresarse como:

$$\{ Q \}_p = \alpha T I \quad 2.5)$$

EL EFECTO THOMSON

Consiste en el calentamiento o enfriamiento producido en un conductor homogéneo al paso de la corriente eléctrica en la dirección del gradiente de temperatura.

La potencia calorífica generada o absorbida por unidad de volumen debida al efecto Thomson se expresa como:

$$\{ \dot{q} \}_t = \tau J \left\{ \frac{dT}{dx} \right\} \quad 2.6)$$

en donde:

$\{ \dot{q} \}_t$ es la potencia calorífica generada o absorbida por unidad de volumen debida al efecto Thomson.

τ es el coeficiente de Thomson.

J es la densidad de corriente eléctrica.

$\left\{ \frac{dT}{dx} \right\}$ es el gradiente de temperatura.

Las unidades de $\{ \dot{q} \}_t$ en S.I. son $W \text{ over } m^3$.

Las unidades de τ en S.I. son $W \text{ over } \{A \sim K\}$.

La potencia calorífica generada o absorbida por unidad de longitud debida al efecto Thomson se expresa como:

$$\{ \{ \dot{Q} \}_t \text{ over } l \} = \tau I \left\{ \frac{dT}{dx} \right\} \quad 2.7)$$

en donde:

\dot{Q}_t es la potencia calorífica generada o absorbida por unidad de longitud debida al efecto Thomson.

Las unidades de \dot{Q}_t en S.I. son W/m .

EL EFECTO JOULE

Consiste en que cuando una corriente eléctrica pasa a través de un conductor isotérmico hay una generación de calor. Este efecto ocurre en cualquier conductor por el que pasa una corriente eléctrica debido a la transferencia de energía eléctrica por un proceso análogo al rozamiento.

Se tiene:

$$\dot{q}_j = \rho J^2 \quad (2.8)$$

en donde:

\dot{q}_j es la potencia calorífica generada por unidad de volumen debido al efecto Joule.

ρ es la resistividad eléctrica.

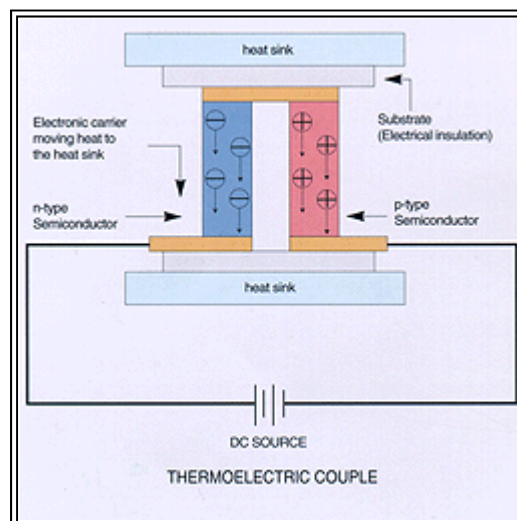
J es la densidad de corriente.

El efecto Joule es un proceso irreversible a diferencia de los efectos Seebeck, Peltier y Thomson que son fenómenos reversibles. En las condiciones de trabajo de las placas termoelectricas hay otro proceso irreversible, que es la conducción térmica.

Fundamentos teóricos del efecto termoelectrico

Introducción

El que una cadena de soldaduras de dos metales distintos produce una corriente eléctrica cuando existe una diferencia de temperatura entre soldaduras alternativas es conocido desde que el físico alemán Thomas Johann Seebeck descubrió en 1821 el efecto que lleva su nombre. Poco después el francés Jean Charles Peltier descubrió en 1834 el fenómeno que puede denominarse inverso. Al pasar una corriente a través de un circuito de dos metales soldados, una de las soldaduras se enfría mientras la otra se calienta, actuando el sistema como una "bomba de calor". El efecto Thomson, descubierto por Lord Kelvin en 1854, completó los descubrimientos anteriores. Este efecto se produce en un circuito de un único material conductor, según el sentido de paso de la corriente eléctrica, el conductor emite o absorbe calor.



Unión de Soldaduras N-P

El enfriamiento termoelectrónico empezó a ser factible a partir de los estudios de Telkes en los años 30 y de Ioffe en 1956, Los nuevos materiales semiconductores irrumpían en la escena produciendo rendimientos mucho mas altos. Telkes utilizo pares o soldaduras de PbS y ZnSb y Ioffe descubrió el uso de PbTe y PbSe. Los Telluros y Seleniuros han sido muy utilizados, y para conversión de energía calorífica en eléctrica se alcanzan rendimientos aceptables.

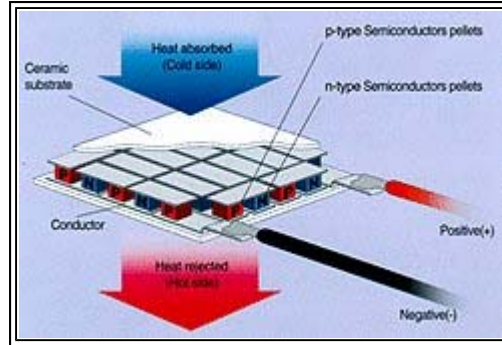
A continuación se exponen los principios de funcionamiento de un elemento termoelectrónico (ETE) típico y se describe el factor de mérito

y el *C.O.P* (*Coefficient Of Performance*) o máximo rendimiento de un dispositivo termoelectrico.

Se explicara como escoger un ETE para una aplicación dada, se expondrán algunos usos comerciales del enfriamiento mediante elementos termoelectronicos y se darán orientaciones para su aplicación.

Finalmente se presentan algunas aplicaciones practicas.

Fundamentos de la teoría termoelectrica



Flujo de Calor

En este apartado se dará un breve a repaso a la teoría de los dispositivos termoelectricos de una forma simplificada, comenzando por la expresion de los coeficientes termoelectricos y se darán orientaciones para su aplicación.

La diferencia de potencial, V entre los bornes 1 y 2 de un convertidor termoelectrico, tal como se indica en la figura 1, puede escribirse a partir de la definicion de un potencial en función de la fuerza que representa:

$$F = -\frac{\partial V}{\partial x} \text{ como:}$$

$$V = \int_1^2 E \cdot dx$$

que en general teniendo en cuenta el efecto termoelectrico sobre el campo eléctrico, $E=qV$, puede ponerse como:

Al estar los bornes 1 y 2 a la misma temperatura las dos primeras integrales se anulan y usando $V=E/q$ tenemos que la fuerza electromotriz para una carga q es:

$$E = \frac{1}{q} \int_{T_f}^{T_c} (S_c^* - S_f^*) \cdot dT$$

definiendo el coeficiente **Seebeck** como:

$$S = \frac{S^*}{q}$$

El calor absorbido por unidad de volumen ($A \, dx$) por el circuito cuando pasa por una corriente eléctrica de densidad J

y $\omega = (TS^* + \Phi)J_e - k\nabla T$ viene dado por:

$$Q = \frac{d\omega}{dx}$$

también se puede escribir como

$$Q = -T \frac{J}{q} \cdot \frac{\partial S^*}{\partial x} - \frac{J^2}{\sigma} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

El segundo termino corresponde al calor generado por efecto **Joule** y el tercero representa la conducción térmica. El primer termino engloba el calentamiento por los efectos **Peltier y Thomson**, el efecto Peltier solo se da de una forma apreciable entre los puntos de contacto entre conductores y su coeficiente relaciona el calor absorbido con la intensidad la corriente I de densidad J.

El coeficiente Peltier se puede definir como la razón entre el flujo de calor y la intensidad eléctrica:

$$\pi = P = \frac{Q}{I}$$

Integrando en una soldadura el primer termino tenemos:

$$dQ = Q_1 S dx = -T \frac{J_s}{q} (S_B^* - S_A^*)$$

y por lo tanto:

$$\pi_{AB} = \frac{T}{q} (S_A^* - S_B^*)$$

Usando estas definiciones se hallan las Relaciones de Kelvin aplicando el primer principio de la termodinámica a un fenómeno termoeléctrico que expresa que la variación de la energía interna U es nula y esta es el calor, Q, menos el trabajo W.

FALTA UNA FÓRMULA !

El calor producido por los efectos Peltier y Thomson es

$$dQ = \Delta\pi + \int \Delta\tau dT$$

y el trabajo, producido por efecto Seebeck,

$$dW = \int \Delta\alpha dT$$

aplicando también el segundo principio de la termodinámica de procesos reversibles, que expresa que la variación de la Entropía es nula. $dS = 0$, obtenemos las relaciones de Kelvin (Capitulo 3):

$$\alpha_{AB} = \frac{\pi_{AB}}{T}$$

y

$$\tau_A - \tau_B = \frac{\partial \alpha_{AB}}{\partial T} \cdot T$$

Estas relaciones, así como las características termoeléctricas de cada par de materiales utilizados en los generadores termoeléctricos por efecto Seebeck y en los refrigeradores por efecto Peltier, se utilizan para optimizar el diseño.

El efecto Thomson refleja el hecho de que a un gradiente de temperatura aplicado a lo largo de un material donde pasa una corriente I le corresponde una absorción o una emisión de calor se define como:

$$\tau = \frac{\frac{dQ}{dx}}{\frac{\partial T}{\partial x}}$$

FALTA UNA FÓRMULA !

por tanto podemos escribir

$$\tau = -\frac{T}{q} \cdot \frac{\partial S^*}{\partial T}$$

Cada material de la unión que forma el termopar tiene su propio coeficiente Thomson, y hay un coeficiente Seebeck,

$$\alpha = \frac{S^*}{q}$$

y otro Peltier

$$\pi = P = S \cdot T$$

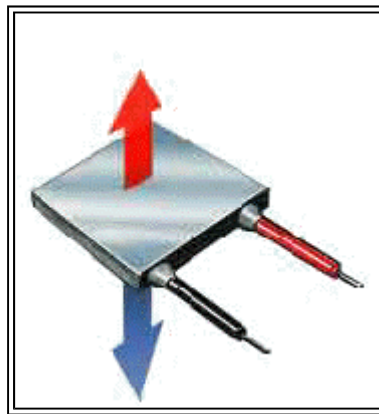
que están relacionados mediante la primera relación de Kelvin (Capítulo 3).

Balance térmico en una placa termoelectrica

Describimos la teoría de los dispositivos termoelectricos, desarrollada desde su descubrimiento por Seebeck y Peltier en 1822 y 1834. También discutimos algunos avances tecnológicos que han permitido el uso comercial del enfriamiento termoelectrónico.

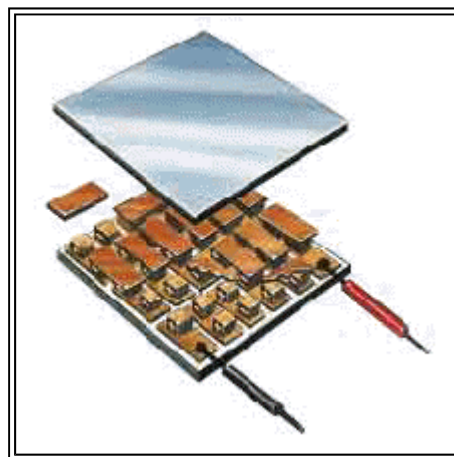
Se describen los principios fundamentales de termodinámica usados para los cálculos de transferencia térmica y con mas detalle la descripción del funcionamiento de una placa termoelectrica y su selección para una aplicación dada.

Funcionamiento y diseño de un Elemento Termoelectrico (ETE).



Elemento Termoelectrico.

Un convertidor termoelectrónico moderno se compone de dos pequeñas piezas semiconductoras A y B, una del tipo n (cargas libres) y la otra del tipo p (huecos libres), unidas en uno de sus extremos mediante una unión metálica o soldadura, si esta soldadura se somete a una fuente de calor, manteniendose a una temperatura (caliente (T_c) mientras que las demás se mantienen a una temperatura mas fría (T_f), se produce una pequeña fuerza electromotriz que genera una corriente eléctrica en el circuito.



Célula de efecto peltier

De forma parecida, debido al efecto Peltier, si se hace pasar una corriente por el circuito de uniones semiconductoras p-n y n-p. unas se calientan y otras se enfrían, produciéndose un gradiente de temperatura entre las placas.

El ETE consta de un número variable de soldaduras colocadas en serie eléctricamente pero en paralelo desde el punto de vista térmico actúa como una pequeña bomba de calor en estado sólido.

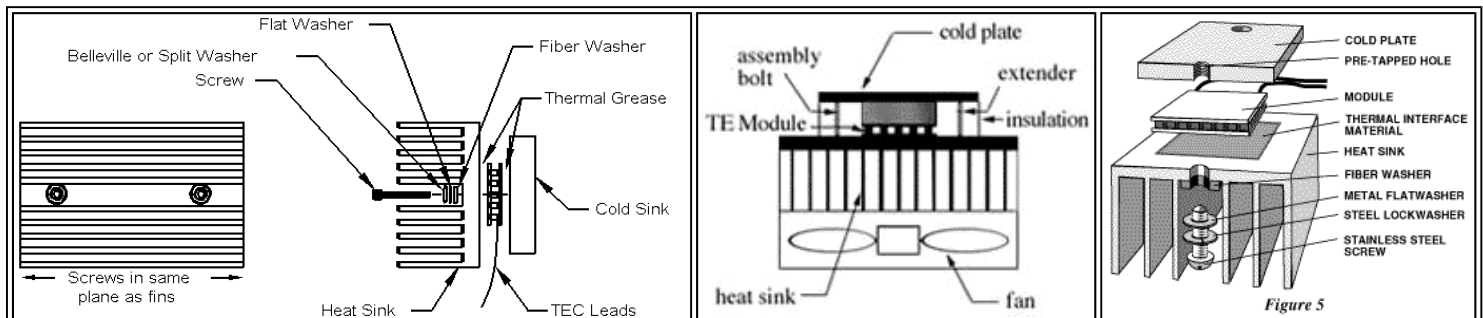
Refrigeración Termoelectrica - Descripción

En el estudio de aplicaciones que pueden usar la refrigeración termoelectrica, así como la elaboración de diferentes equipos de refrigeración que satisfagan las necesidades actuales en este campo hay que tener en cuenta que la refrigeración por métodos termoelectricos podría sustituir en bastantes casos a los sistemas de refrigeración actuales, eliminando así el uso de los CFC, gases contaminantes que destruyen de la capa de ozono. Además de esta, la refrigeración termoelectrica posee diversas ventajas, entre las que se pueden destacar:

- Producción de frío y calor indistintamente simplemente invirtiendo la polaridad de la tensión aplicada.
- Ser totalmente silenciosas, así como no producir vibraciones.
- Fácil variación de la potencia refrigerante, actuando sobre la tensión de alimentación.
- No necesitan mantenimiento.
- No posee elementos móviles.
- Asegura la estanqueidad del elemento a refrigerar.
- Puede funcionar en cualquier posición.

En función de las características de la refrigeración termoelectrica expuestas, el campo de estudio y aplicación de esta es muy amplio. Es posible el estudio de aplicaciones concretas tales como: refrigeración de cuadros eléctricos, refrigeración de frigoríficos portátiles.

Son importantes las aplicaciones alternativas que puedan utilizar termoelectrico, como pueden ser aplicaciones en medicina, sistemas de refrigeración de aire acondicionado para habitáculos reducidos, etc.



Sistemas de Montaje Termoelectrico

Un ETE, ver figura, estaría compuesto por un conjunto de células termoelectricas fijadas sobre un sistema de disipación (fuente caliente), compuesto por un disipador y un conjunto de ventiladores, cuya misión es la de evacuar por convección forzada la mayor cantidad de calor posible.

Por la otra cara de las células termoelectricas actúa un sistema de conducción de calor desde la fuente fría, compuesto por un disipador y un conjunto de bloques transmisores de ajuste. Este ultimo tiene la doble misión de fijar las células termoelectricas y procurar una conducción adecuada de calor desde la fuente fría.

No obstante el equipo variara en función de las necesidades del propio elemento a refrigerar.

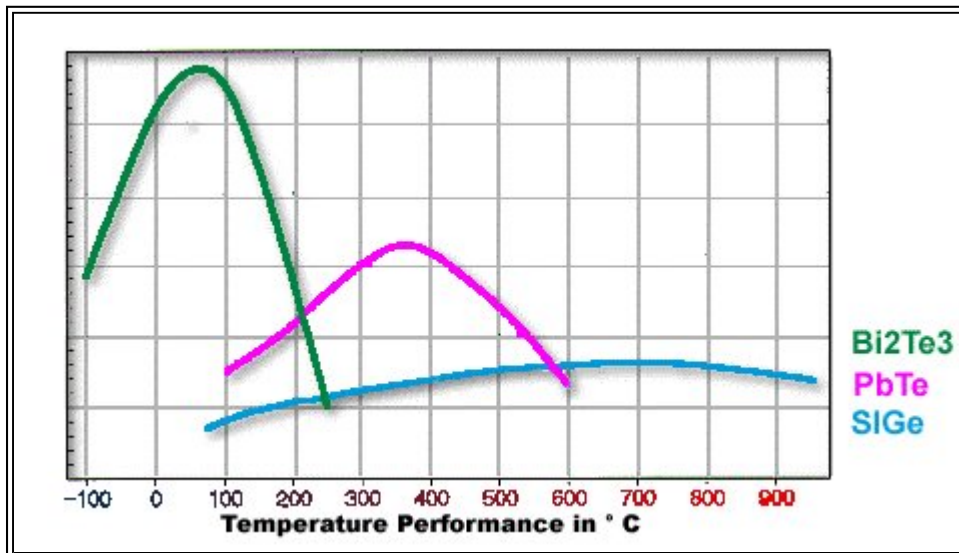
El rendimiento del equipo refrigerante termoelectrico ira en función de varios factores: buen asentamiento de las células termoelectricas tanto en el disipador del lado caliente como en el bloque de ajuste, para evitar perdidas, en cuanto a los disipadores deben poseer un coeficiente de conductividad adecuado y una superficie lo mas grande posible, para que la evacuación de calor sea efectiva, procurando al disipador de calor una convección forzada suficiente, para facilitar la emisión de calor al exterior, por que cuanto mas baja mantengamos la temperatura del lado caliente menores temperaturas obtendremos en lado frío, dado que el salto térmico de las células termoelectricas permanece aproximadamente constante, también es importante calcular la intensidad de funcionamiento optimo, para obtener el máximo rendimiento.

Esto es de fundamental importancia para poder competir en mercados internacionales, ya que debido la gran sensibilidad del rendimiento de

los sistemas en función del montaje idóneo.

Elementos similares, bien o mal elaborados, pueden tener grandes diferencias tanto en cuanto al salto térmico máximo, como a la potencia refrigeradora.

Dentro de la instalación termoeléctrica frigorífica conviene definir un parámetro, en función de las características específicas de los elementos empleados como conductores en dicha instalación, y buscar la relación de este con el rendimiento térmico de la instalación. Estas son las curvas de rendimiento de los materiales termoeléctricos.



Curvas de Rendimiento de materiales Termoeléctricos

Como antes se ha mencionado la instalación termoeléctrica tal como se ve en la figura ex`puesta, es un circuito termoeléctrico al que se le aplica una diferencia de potencial de una fuente externa, apareciendo una cesión de calor por unidad de tiempo a la fuente caliente igual a

$$Q_{p1} = S \cdot T_1 \cdot I$$

donde T1 es la temperatura de la fuente caliente, S es el coeficiente termoeléctrico y I la intensidad que atraviesa el circuito, y una absorción de calor por unidad de tiempo en la junta fría de valor

$$Q_{p2} = S \cdot T_2 \cdot I$$

donde T2 es la temperatura de la fuente fría. Teniendo en cuenta las pérdidas de calor por unidad de tiempo por efecto Joule, las cuales se suponen que desvían la mitad para cada junta, es decir

$$Q_j = \frac{1}{2} I^2 R$$

donde R es la resistencia promedio de los conductores.

La pérdida de calor por conducción de la junta caliente a la junta fría ocurre siempre por una combinación de la conducción a través de los distintos materiales que forman la placa o

$$Q_c = K(T_1 - T_2)$$

Elemento termoeléctrico y la convección entre los huecos de la misma. Podemos expresar de forma simplificada este flujo de calor como donde K depende de la conductividad térmica del material, de su longitud y de su sección transversal. ($K = k A/L$) La relación entre la conductividad térmica, que tiene dimensiones de una velocidad por una longitud

$$[\kappa] = L^2 T^{-1}$$

Y el coeficiente de conducción k es función de la densidad y del calor específico del material

$$\kappa = \frac{k}{\rho \cdot c}$$

La cantidad de calor neto que puede ser absorbida de la fuente fría, sería haciendo un balance con los respectivos signos

$$Q_d = Q_{p1} + Q_j - Q_c$$

Y la cantidad de calor que se ha de disipar a través del lado caliente de la placa termoelectrica, será:

Y se tiene aplicando el primer principio de la termodinámica (ver tema 9), que la potencia eléctrica será la diferencia de ambas expresiones, es decir Ya que Se describen dos modos de operación básicos para las bombas de calor, que son:

- a) de máximo bombeo de calor o máxima refrigeración y
- b) de máximo rendimiento o COP (Coeficiente of Performance).

La primera es obtenida diferenciando el calor neto con respecto a la intensidad e igualando a cero,

$$\frac{dQ_{neto}}{dI} = 0$$

quedando:

$$I_{max} = \frac{S \cdot T_2}{R}$$

con lo cual la intensidad a la cual el calor neto extraído del lado frío de la placa es máximo es:

El máximo salto térmico se puede obtener introduciendo la I_{max} en la expresión del calor neto e igualándolo a cero, ya que así, cuando el calor producido por efecto Peltier, equilibre la disipación en el lado frío por efecto Joule mas el flujo de calor por conducción a través de la placa se habrá alcanzado la máxima diferencia de temperatura entre el lado caliente y frío de la placa.

Y despejando el salto máximo de temperatura tenemos

$$\Delta T_{max} = \frac{\frac{1}{2} S^2 T_2}{R \kappa}$$

$$Z = \frac{S^2}{R \kappa}$$

Aquí es donde aparece la figura de mérito, que es resultado de combinar el coeficiente termoelectrico por efecto Seebeck, la resistencia eléctrica y el coeficiente de conductividad, y es igual para que el sistema termoelectrico funcione a máximo rendimiento (Coeficient of Performance, COP), es necesario maximizar el cociente entre el calor neto transportado y la potencia eléctrica necesaria para producir ese flujo de calor,

$$COP = \left\{ \frac{Q_{net}}{P} \right\} \quad (25)$$

que expresado en función de los distintos términos, puede expresarse como

$$COP = \left\{ \frac{S T_2 I - \frac{1}{2} R I^2 - \kappa (T_1 - T_2)}{R I^2 + S (T_1 - T_2)} \right\} \quad (26)$$

Pudiéndose obtener el COP_{max}, diferenciando con respecto a la intensidad, igualando a cero, este máximo corresponde a la intensidad I_{cop} que puede expresarse como

$$I_{cop} = \left\{ \frac{\kappa (T_1 - T_2)}{\frac{1}{2} S (T_1 + T_2)} \right\}$$

$$\cdot \left[\left(1 + \frac{1}{2} Z (T_1 + T_2) \right)^{1/2} + 1 \right] \quad (27)$$

Introduciendo la intensidad obtenida, I_{cop}, dada en la expresión del COP, obtenemos

$$COP_{max} = \left\{ \frac{\left[1 + \frac{1}{2} Z (T_1 + T_2) \right]^{1/2} - T_1 / T_2}{\left[1 + \frac{1}{2} Z (T_1 + T_2) \right]} \right\}$$

$$Z(T_1 + T_2)^{1/2} + 1 \cdot \left\{ \frac{T_2}{T_1 - T_2} \right\} \cdot (28)$$

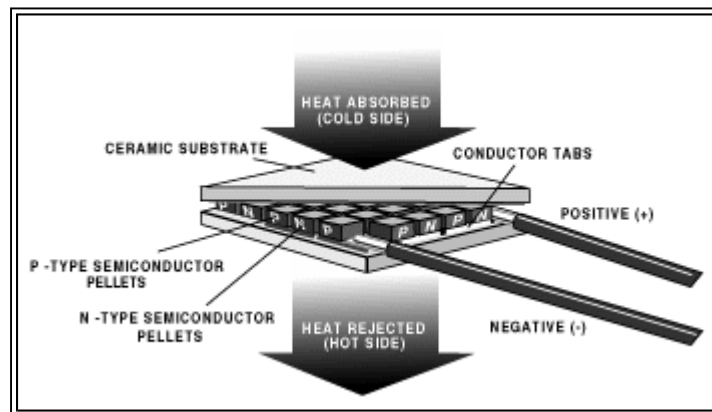
Obteniendo el resultado en función de la figura de mérito termoeléctrico y las temperaturas de la junta caliente y fría.

Estos cálculos son de gran importancia para el correcto diseño de un sistema termoeléctrico, estos pueden ajustarse para trabajar, bien a máximo COP o bien a máxima refrigeración. El ajuste de las intensidades de funcionamiento dependerán del uso que se le quiera dar a la aplicación

2.3.-Descripción de una placa termoeléctrica

Una célula o placa termoeléctrica, está constituida por una serie de elementos semiconductores de tipos N y P, que están dispuestos sobre una superficie cerámica, electricamente en serie y termicamente en paralelo. El número de semiconductores siempre es impar, y los más utilizados forman un conjunto de 7 - 31 - 71 - 127 elementos.

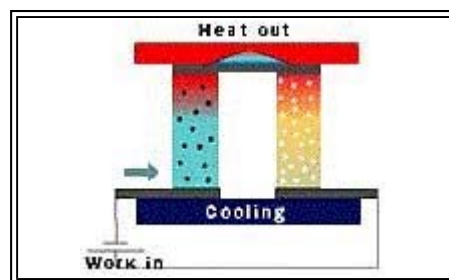
A algunas células termoeléctricas en el montaje se les aplica doble barrera de níquel, con la finalidad de evitar un rápido deterioro en un constante cambio de tensiones.



Célula de Efecto Peltier

Elementos que la constituyen

Las células convencionales que se comercializan en el mercado, esencialmente están compuestas por dos tipos de elementos semiconductores, Telururo de Bismuto y el Seleniuro de Antimonio. Debido a la escasez de alguno de los componentes y a su baja producción, el costo de estos aún es elevado en el mercado. Las placas cerámicas que están dispuestas en ambas caras llevan pistas de cobre que permiten unir los semiconductores en serie y termicamente en paralelo.

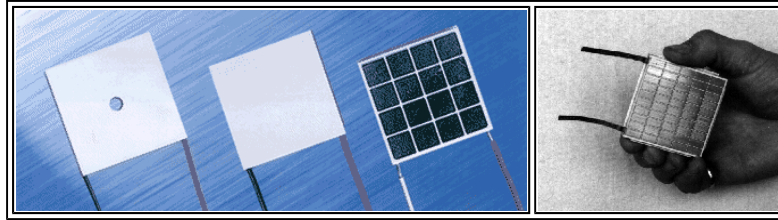


Esquema de una unión N-P

Tipos de placas (Efecto Seebeck – Efecto Peltier)

Existen en el mercado dos tipos de placas que se utilizan para generar una corriente eléctrica, las llamadas placas de efecto Peltier o conocidas también con el nombre de placas termoeléctricas y las llamadas placas de efecto Seebeck.

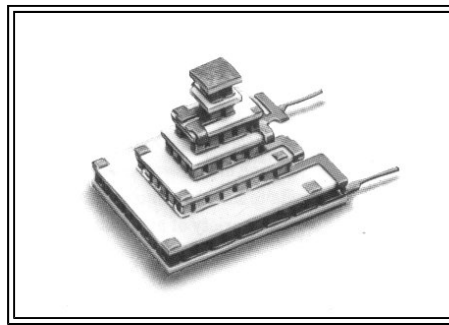
Las placas de efecto Peltier son las más utilizadas debido a que su costo en el mercado cada vez es menor y sus aplicaciones para el mercado del consumo se incrementa día a día. Las placas de efecto Seebeck, son placas de alto costo, que prometen ser importantes en un futuro no muy lejano y permiten recuperar energía de focos calientes, como el de los tubos de escape en los automóviles.



Placas de Efecto Peltier Placa de Efecto Seebeck

Niveles

Las placas multinivel nos permite conseguir saltos termicos importantes frente a la temperatura ambiente, pudiendo llegar incluso a diferencias de 130°C. Las potencias a disipar, a medida que aumentamos los gradies térmicos son cada vez menores, pero las ventajas de poder refrigerar puntualmente son muy importantes.



Placa Multinivel -130°C

CÁLCULOS

Seguidamente se desarrollará el calculo de la potencia calorífica en celulas termoelectricas utilizando propiedades de transporte promediadas.

Se va a suponer que en el funcionamiento de las celulas termoelectricas solo hay flujo de calor en la direccion de las x, o sea solo hay flujo de calor a traves de los pares termoelectricos. Ademas, todo el flujo de calor pasa por las placas metalicas entre las que estan los pares termoelectricos. Se va a considerar uno de estos pares termoelectricos para encontrar una formula que dé tanto el calor extraido del foco frío por una celula termoelectrica, $\{\dot{Q}_c\}_{cel}$, como el calor suministrado al foco caliente tambien por una celula termoelectrica, $\{\dot{Q}_h\}_{cel}$.

Un par termoelectrico esta formado por dos conductores distintos dispuestos segun Figura 5 y por lo tanto esta sometido a los cuatro efectos explicados anteriormente.

2.4-Análisis de los Transitorios en la Operatividad de Módulos Termoeléctricos

Un análisis exhaustivo del fenómeno termoeléctrico es un proceso bastante difícil de conseguir incluso para problemas simplificados de régimen continuo en los que se requieren distintas presunciones, tales como las propiedades promedio de los módulos. Seguidamente analizaremos una placa Marlow, los resultados analíticos se comparan bien con resultados experimentales.

Asumimos una temperatura uniforme a través de la placa (TEC), y en primer lugar la ecuación diferencial será:

$$m c \frac{dT}{dt} = Q - Q_{net} \quad (29)$$

de donde: T es la temperatura, t es el tiempo, Q el calor externo y Q_C el calor bombeado por el ETE, m es la masa de la placa que se refrigera y c el calor especifico de la placa del modulo

En la ecuación adjunta podemos sustituir, tomando en cuenta la ecuación (19) y que existen diferencias entre un estado continuado y estados transitorios: esta es una suposición muy critica, pero que ha sido verificada experimentalmente.

$$m c \frac{dT}{dt} = Q - (S T I - \{1 \over 2\} I^2 R - \kappa \Delta T) \quad (30)$$

Simplificando y separando las variables podemos expresarla eq (30) como

$$\frac{dT}{T - T_c} = \frac{SI + \kappa}{mc} dt \quad (31)$$

e integrando

$$T = (T_0 - T_c) \sim e^{-\frac{SI + \kappa}{mc} t} + T_c \quad (32)$$

Al término $\frac{mc}{SI + \kappa}$ le llamamos constante temporal, pero en este caso todos los términos son dependientes de la temperatura y tendrán valores constantes solo en puntos fijos para ciertas temperaturas, y algunos valores estables de intensidad de corriente. Aproximadamente el valor que encontramos para el módulo de prueba es de 10 a 20 segundos. (Según la ecuación 31). Los cambios de temperatura se midieron cada cinco segundos y esos fueron los valores de las temperaturas que se utilizaron en cada momento. Las ecuaciones para determinar las temperaturas calientes se pueden derivar de la misma manera tal como se muestran a continuación:

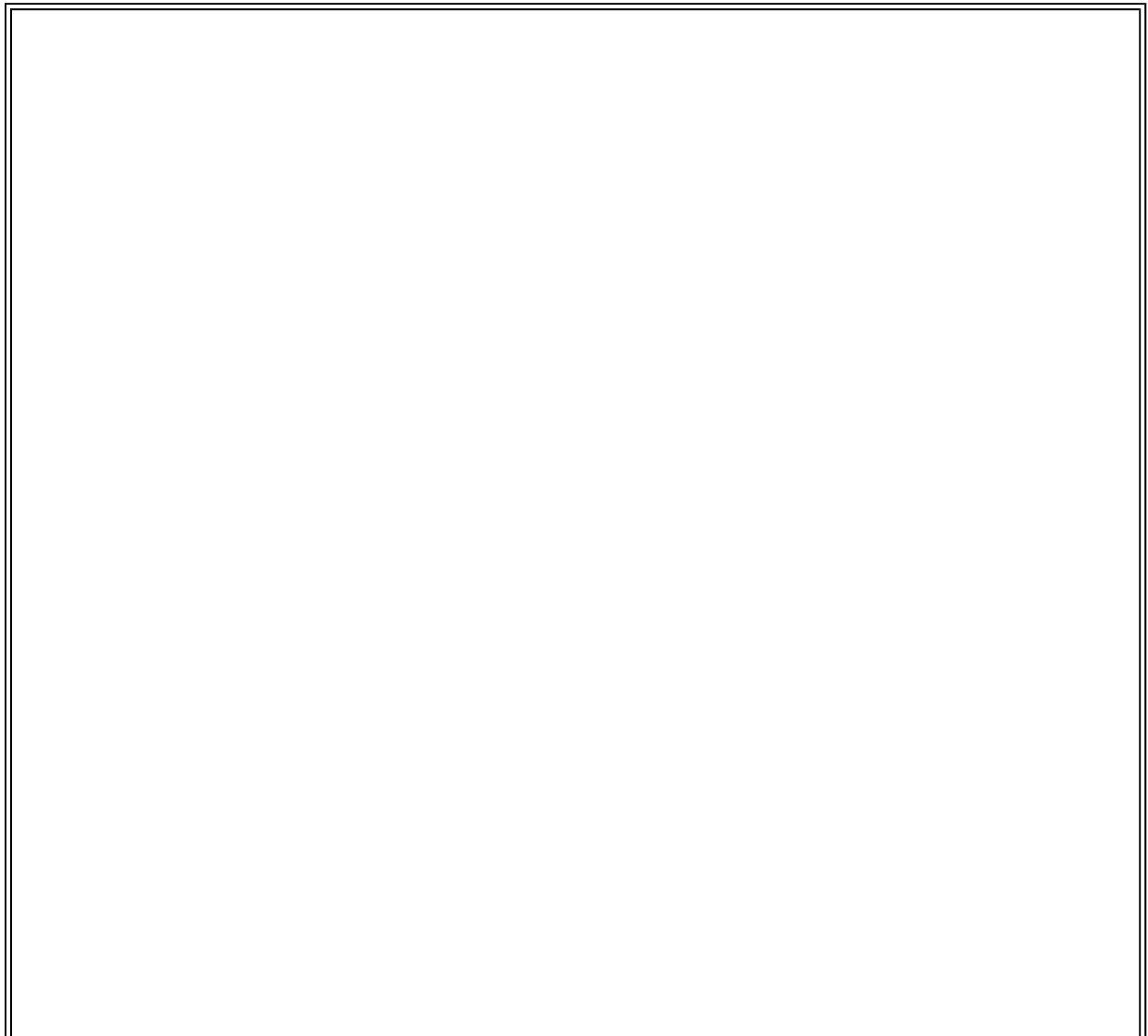
La temperatura en estado estacionario T_e viene dada por:

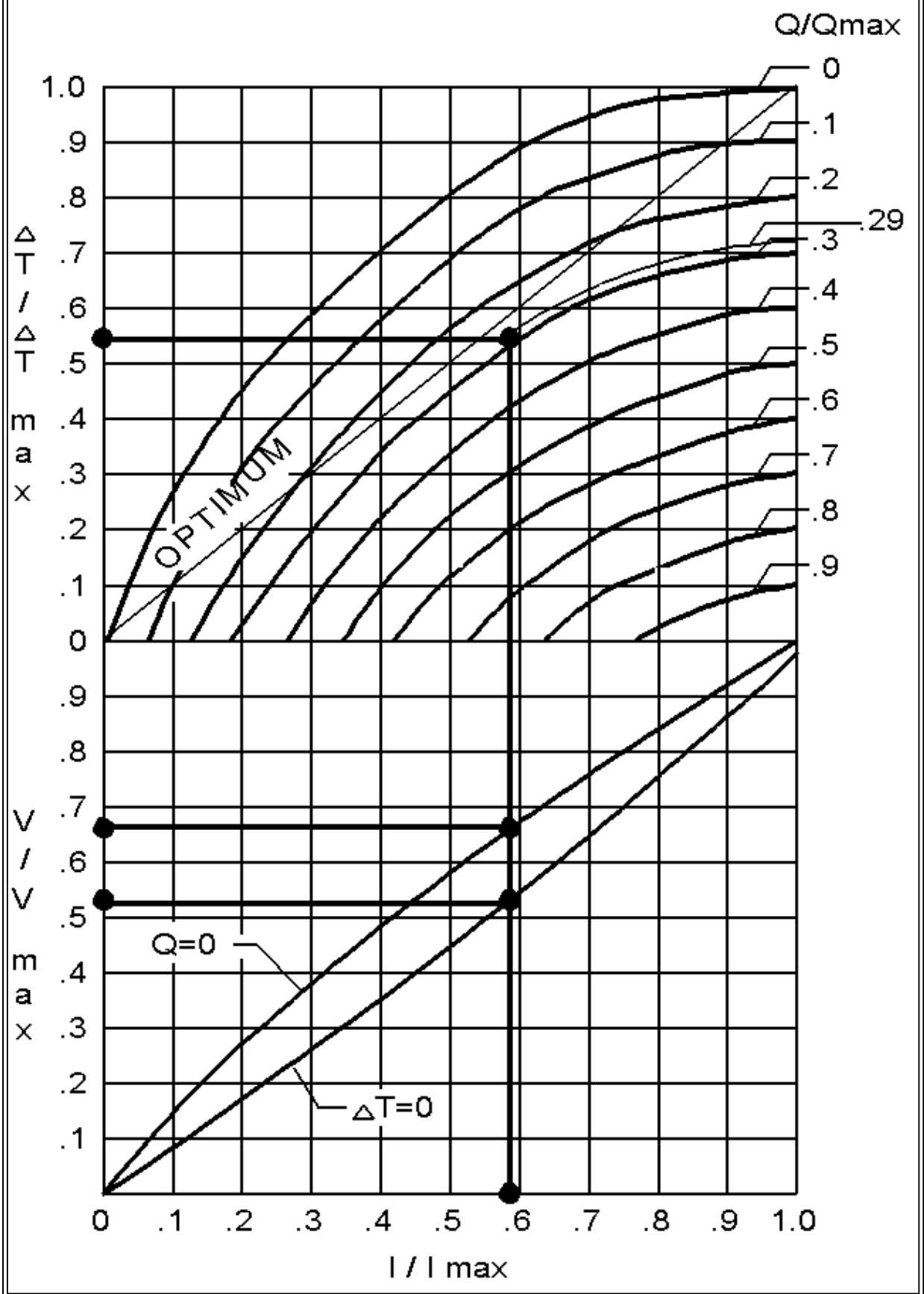
$$T_e = \frac{-Q_h + Q_j + \kappa \Delta T}{SI + \kappa} + T_c \quad (33)$$

La temperatura del Transitorio es por tanto

$$T = T_e + (T_0 - T_e) \sim e^{-\frac{SI + \kappa}{mc} t} \quad (34) \text{ mo el H}_2\text{O (hielo: estado sólido; agua: estado líquido; vapor: estado gaseoso).$$

Figura de Mérito - Curvas de Rendimiento





Curvas Universales de rendimiento termoelectrico

www.sistelec.com.ar

servicios@sistelec.com.ar
