

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA BOMBA DE CALOR TERMoeLECTRICA**

**MARIO CARAZO ARAUJO**

**CARLOS OSORIO NORIEGA**

**CORPORACION UNIVERSITARIA TECNOLOGICA DE BOLIVAR**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERIAS**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA**

**CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.**

**1995**

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA BOMBA DE CALOR TERMoeLECTRICA**

**MARIO CARAZO ARAUJO**

**CARLOS OSORIO NORIEGA**

**Trabajo presentado como requisito parcial  
para optar el título de Ingeniero Mecánico**

**Director: WALBERTO ROCA BECHARA**

**Ingeniero Mecánico**

**CORPORACION UNIVERSITARIA TECNOLOGICA DE BOLIVAR**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERIAS**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA**

**CARTAGENA DE INDIAS. D. T. Y C.**

**1995**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos a:

WALBERTO ROCA BECHARA, Subgerente IMAN LTDA, Ingeniero Mecánico.

ROQUE MALDONADO, Jubilado de ECOPETROL, Instrumentista.

Cartagena, Octubre 20 de 1995

Señores  
**COMITE DE PROYECTO DE GRADO**  
Facultad de Ingeniería Mecánica  
Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar

Estimados Señores:

La razón de este comunicado es para dar a conocer la intención de los señores Mario Carazo Araujo y Carlos Osorio Noriega de presentar el Proyecto de Grado denominado "**DISEÑO Y CONSTRUCCION UNA BOMBA DE CALOR TERMOLECTRICA**", el cual ha sido culminado cabalmente, para optar el Título de Ingeniero Mecánico.

Atentamente,

**MARIO CARAZO ARAUJO**  
**NORIEGA**  
**COD. 9503353**

**CARLOS OSORIO**  
**COD. 9503361**

Cartagena, Octubre 20 de 1995

Señores

**COMITE DE PROYECTO DE GRADO**

Facultad de Ingeniería Mecánica

Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar

Estimados Señores:

Me dirijo a ustedes para dar a conocer este proyecto de Diseño y Construcción de una Bomba de Calor Termoeléctrica, realizada por los señores Mario Carazo Araujo y Carlos Osorio Noriega, donde he sido su asesor en cada una de las partes en que se desarrolló este proyecto, con el fin de mostrar un proyecto bien pensado y bien elaborado, para nuestra facultad de Ingeniería Mecánica.

Atentamente,

**WALBERTO ROCA BECHARA**  
Ingeniero Mecánico

## **LISTA DE TABLAS**

TABLA 1. Propiedades de los semiconductores tipo p y n para módulos termoeléctricos (base Teluro de bismuto).

TABLA 2. Propiedades promedios del material del módulo  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$

TABLA 3. Iteraciones del cálculo para el módulo termoeléctrico variando el diferencial de temperatura.

TABLA 4. Iteraciones del cálculo del radiador.

## **LISTA DE ANEXOS**

ANEXO A. Listado de módulos termoeléctricos fabricados por Cambion.

ANEXO B. Características de desempeño del módulo termoeléctrico para la bomba de calor.

## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1. Diagrama de bandas de energía para metales, aislantes y semiconductores
- FIGURA 2. Comportamiento de un semiconductor debido a un voltaje.
- FIGURA 3. Diagrama de tensión por efecto Hall
- FIGURA 4. Diagramas de banda para semiconductores tipo n y p
- FIGURA 5. Comportamiento de un dispositivo p - n debido a un voltaje
- FIGURA 6. Diagrama de características tensión-corriente de una unión p-n
- FIGURA 7. Ciclo de Carnot invertido
- FIGURA 8. Aplicación de un sistema de refrigeración basado en módulos termoeléctricos
- FIGURA 9. Bomba de calor termoeléctrica
- FIGURA 10. Cupla termoeléctrica
- FIGURA 11. Parámetro Merit Vs Temperatura
- FIGURA 12. Módulos termoeléctricos en serie o cascada
- FIGURA 13. Curva de desempeño para un módulo termoeléctrico
- FIGURA 14. Comparación cupla termoeléctrica Vs compresor
- FIGURA 15. Módulos termoeléctricos de diferentes formas según la necesidad y desempeño
- FIGURA 16. Aplicación de enfriamiento para chips de computadores con módulos termoeléctricos
- FIGURA 17. Curva de desempeño del módulo patrón de la Empresa Cambion
- FIGURA 18. Configuración externa de la Bomba de Calor Termoeléctrica
- FIGURA 19. Circuito estabilizador de Lazo abierto



FIGURA 20. Circuito estabilizador de Lazo cerrado

FIGURA 21. Circuito de control por termostato

FIGURA 22. Conversión mediante shunt para amperímetro

FIGURA 23. Conversión mediante shunt para voltímetro

## **DEDICATORIA**

A mi Madre por todos los sacrificios hechos durante el transcurso de mi Pre-grado de Ingeniería Mecánica.

A Dios por que siempre ha estado conmigo durante todo este esfuerzo de sacar adelante todos mis proyectos.

MARIO CARAZO ARAUJO

## **DEDICATORIA**

A mi Padre a quien le dedico todo este esfuerzo de tantos años.

A mi Suegro por su persistencia para que yo llevara a cabo este proyecto.

CARLOS JOSE OSORIO NORIEGA

# **ANEXOS**

Artículo 105. La Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar, se reserva el derecho de propiedad intelectual de todos los Trabajos de Grado aprobados y no pueden ser explotados comercialmente sin su autorización.

## **INTRODUCCION**

El propósito de una Bomba de Calor Termoeléctrica es la de proporcionar una temperatura más alta que la ambiental o en otras palabras lo que llamamos "Calefacción".

Tradicionalmente las bombas de calor trabajan con el sistema de compresión de vapor

mediante el ciclo invertido en un equipo tradicional de refrigeración; pero este concepto va más allá, ya que abarca el principio de la Ley de la degradación de la energía, es decir una maquina no puede convertir toda la energía suministrada en trabajo, ya que tiene que descargar parte de su calor a un sumidero naturalmente accesible.

La Termoelectricidad es fácil confundirla con la electricidad generada a través de una planta térmica; desde el punto de vista de la Refrigeración y Aire Acondicionado a ésta se define como la serie de fenómenos que surgen de la transformación de la energía.

Este proyecto tiene como objetivo diseñar y construir una bomba de calor termoeléctrica con el fin de estudiar los efectos de Seebeck, Peltier y Thomson y el efecto de enfriamiento los cuales componen el fenómeno de la termoelectricidad. Con los efectos de Seebeck, Peltier y Thomson.

Con esta bomba se podrán experimentar con efectos alternativos para producir o aprovechar la energía que convencionalmente no se podría captar con bombas de calor por compresión de vapor, o cualquier otro equipo que se mueva basado en el principio de la Ley de la degradación de la energía o Segunda Ley de la Termodinámica. Una bomba de calor termoeléctrica proveería al estudiante de Ingeniería Mecánica una herramienta más para comprender los fenómenos relacionados con la transformación de la energía, con un equipo de poco peso el cual podrá desplazarse de un sitio a otro donde se observaran los resultados de una forma clara y precisa.

El diseño y construcción de esta bomba permitirá ver los resultados, de temperatura, voltaje, amperios y coeficiente de performance COP luego de modificar las variables en estudio y ver su influencia en el transcurso de las experiencias, motivados por una guía de

laboratorio que ayudará al aprendizaje de esta ciencia que representa un renglón muy importante para la producción de enfriamiento y/o aprovechamiento de conversión de energía, contribuyendo a conservar el medio ambiente.

El estudio y análisis de un sistema alternativo al sistema convencional de compresión de vapor, es en estos momentos apremiante, teniendo en cuenta el protocolo de Montreal, donde se llama a la restricción de los CFC y los freones que atacan la capa de ozono, ya existen refrigerantes que no dañan la capa de ozono.

Pero al mismo tiempo es interesante poder mostrar un dispositivo que sin pretender reemplazar a corto plazo un compresor, posee muchas ventajas que lo hacen indispensable para refrigerar en sitios donde el compresor no puede trabajar; condiciones de espacio, posición, gravedad diferente a la normal, bajas capacidades de refrigeración, etc.

Es así que el presente proyecto se ha dividido en capítulos, en el primero se presenta el calor y temperatura, mostrándose desde el punto de vista macroscópico.

En el segundo los conceptos de semiconductores y bombas de calor, donde se presenta lo referente a teoría de semiconductores y sus reacciones a estímulos externos como la electricidad, sus clases y compuestos más comunes, de bombas de calor se ubica en el contexto de refrigeración y calefacción.

En el tercero, se estudia los efectos termoeléctricos, definiendo termoelectricidad, sus características, aplicaciones, y relaciones más importantes de las variables que intervienen.

En el siguiente presenta el desempeño de las cuplas termoeléctricas, complementando lo abordado en el capítulo segundo, entrando en materia referente a como funciona y eficiencia respecto al sistema de refrigeración convencional comparando con las variables termoeléctrica, derivada del estudio de los semiconductores.

Dentro del capítulo quinto se tiene el cálculo de módulos termoeléctricos dependiendo de la aplicación que se necesite y la escogencia de un módulo dependiendo de las curvas de desempeño.

En el sexto, cálculo del radiador que va a disipar el calor generado por el módulo en el lado caliente y su repercusión en el desempeño del mismo, también la forma de instalar un módulo termoeléctrico en un radiador.

El séptimo trata de mostrar la manera como se llevó a la configuración existente para la bomba termoeléctrica, teniendo en cuenta las variables que están involucradas en los efectos termoeléctricos.

En el octavo está el diseño de instrumentación, para cada circuito donde tendrán los cálculos para adaptar los amperímetros y voltímetros a las escalas de trabajo del módulo por medio de resistencias Shunt.

En el noveno trata, de la guía del laboratorio para el equipo y las curvas que se obtienen de cada experiencia, mostrando el desempeño del dispositivo termoeléctrico bajo condiciones de carga.



## 1 CONCEPTOS DE CALOR Y TEMPERATURA

Calor (Q). Es la energía en transición de un sistema a otro, existiendo una diferencia de temperatura entre estos.

Se observa que el calor y el trabajo son energías en tránsito; que entra o sale de un sistema, dependiendo de un potencial impulsor llamado temperatura.

El calor en transición entrando o saliendo en un sistema, da como resultado un cambio en la energía interna o un trabajo realizado por el sistema, pero al entrar en éste, deja de ser calor.

El trabajo es 100% disponible para su conversión en otras formas de energía mientras que el calor no puede convertirse 100% ya que no existe la máquina perfecta.

Atendiendo a lo anterior existen dos leyes fundamentales y generales en la termodinámica denotan lo siguiente:

- La energía sólo se transforma pero no se destruye.

- Es imposible que el calor sea transferido desde una temperatura más baja hacia otra más alta.

La primera no es más que la ley de la conservación de la energía, existen varios hechos que conllevan a que la definición de la primera ley sea de la conservación de la energía:

La energía es transformada de una forma u otra; la energía es siempre conservada; la energía no puede ser creada o destruida; la sumatoria total de todas las energías permanece constante.

La primera ley de la termodinámica envuelve transferencia de calor y trabajo, diciéndose que el calor y el trabajo son mutuamente convertibles.

Lo anterior envuelve los llamados sistemas abiertos y cerrados y procesos en estado estable, que no cambian con el tiempo.

Los procesos pueden ser reversibles o irreversibles. Un proceso reversible es uno en que tanto como el sistema y alrededor puede retornar a su estado inicial, lo que no es posible en un proceso irreversible. Ningún proceso que involucre fricción o un potencial desbalanceado puede ser reversible. Todos los procesos actuales son irreversibles, ya que cualquier proceso reversible que comienza y finaliza con el sistema en el mismo estado es llamado ciclo reversible.

La segunda ley de la termodinámica dice que la conservación de calor a trabajo está limitada por la temperatura a que la conversión ocurre. Esto puede ser mostrado como:

- Ningún ciclo puede ser más eficiente que un ciclo reversible operando entre límites de temperatura.

- La eficiencia de todos los ciclos reversibles absorbiendo calor únicamente a una temperatura constante alta  $T_1$  y rechazando calor a una baja temperatura constante  $T_2$  será la misma.

- Para cada uno de los ciclos, la eficiencia es:

$$e = \frac{W}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Llamado usualmente ciclo de Carnot, por la primera ley

$$W = Q_1 + Q_2 \rightarrow \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Existe una expresión que denota el cambio de calor con la temperatura, llamada entropía y depende únicamente del estado o condición de la sustancia.

Para mensurar o medir el calor existente las unidades: BTU, Unidad Térmica Británica, que es el calor necesario para colocar en un litro de agua un grado Fahrenheit, caloría que es definida como el calor requerido para aumentar en grado de agua un grado centígrado a  $15^\circ\text{C}$ .

## 2 CONCEPTOS DE SEMICONDUCTORES Y BOMBAS DE CALOR

### 2.1 TEORIA DE SEMICONDUCTORES

Los semiconductores son materiales parcialmente conductores y parcialmente aislantes de la electricidad; pero cuando se incorpora una impureza, puede aceptar o rechazar electrones, destacándose el hecho de que los electrones de valencia o exteriores están en estado estable.

Su resistividad decrece con la temperatura y puede volverse inútil luego de sobrepasar su límite de la temperatura; existen varios tipos de semiconductores destacándose los de tipo p, que resulta de la adición de una impureza que deja un hueco y los tipo n, ocurre el mismo fenómeno pero en vez de un hueco deja un electrón.

Una propiedad importante es que su resistividad también puede variar por la adición de impurezas o dopado, es decir provocará un cambio en la banda de conducción en el semiconductor. Los semiconductores tienen resistencias eléctricas comprendidas entre  $10^{-5}$  y  $10^7 \cdot m$ , y pueden ser cristalinos o amorfos.

Las discontinuidades presentes en el semiconductor son intervalos de energía o de banda. En la Figura 1 vemos el arreglo típico de las bandas de energía de los metales, aislantes y semiconductores; para el caso de los semiconductores la banda de conducción está incompleta permitiendo el movimiento libre de los electrones en los metales.

Los semiconductores tienen una banda de valencia llena con un intervalo de banda relativamente pequeño que le separa de la banda de conducción. En cambio los aislantes

tienen bandas de conducción vacías pero las de valencia llenas.

Los semiconductores pueden ser extrínsecos o intrínsecos, los intrínsecos son los que tienen baja concentración de impurezas y propiedades eléctricas características del semiconductor puro, y los extrínsecos poseen concentraciones mayores que los intrínsecos de impurezas y propiedades eléctricas modificadas.

El mecanismo de transporte de electrones desde la banda de valencia hasta la banda de conducción se debe a incrementos de temperatura, donde los electrones y los huecos participan en la conducción eléctrica, los electrones con carga negativa y los huecos con carga positiva. Ver la Figura 2.

Existen efectos producidos por los semiconductores, dentro de los cuales se encuentran: Efectos de la irradiación de alta energía, efecto Hall, efectos fotoconductores, efectos termoeléctricos y efectos acusticoeléctrico.

2.1.1 Efecto de la irradiación de alta energía. La irradiación de alta energía puede provocar imperfecciones en el cristal (lagunas o espacios vacantes e intersticiales), que sirven como centros de recombinación y reducen el tiempo de vida en portadores minoritarios. Irradiaciones como Rayos X, Rayos  $\gamma$ , Electrones u otra radiación ionizante generan imperfecciones.

2.1.2 Efecto Hall. Un campo aplicado transversalmente a un material portador de corriente obligará a los portadores móviles a acumularse en una cara del conductor. Debido a lo anterior se desarrolla un campo eléctrico como el mostrado en la Figura 3. Donde  $J_x$  es densidad de corriente en dirección  $x$ ,  $B_y$  inducción magnética en dirección  $y$ ,

Rh coeficiente Hall para un semiconductor tipo n.

$$R_h = E_h / (J_x \cdot B_y) = -1 / (en) \quad \text{ecuación 1}$$

n = densidad de electrones ( $m^{-3}$ )

e = carga electrónica (c)

$E_h$  = carga eléctrica

Los semiconductores tipo p presentan Rh positivo.

2.1.3 Efectos fotoconductores. Se produce cuando los fotones con altísima energía causan pares electrón - hueco, los portadores excedentes causan aumento de conductividad; cuando se iluminan uniones no polarizadas se desarrollan tensiones entre ambos lados de la unión resultando el llamado efecto fotovoltaico.

2.1.4 Efectos Termoeléctricos. Conversión de la energía eléctrica en calor o refrigeración por medio de una cupla de materiales diferentes, más adelante ampliaremos con la termoelectricidad y sus efectos.

2.1.5 Efectos Acusticoeléctricos. Se origina una corriente eléctrica debido a ondas acústicas longitudinales. La longitud de movimiento transmitida por las ondas a los electrones hace que fluya una corriente eléctrica.

De acuerdo a lo anterior se presenta la unión p - n donde ocurren unos fenómenos que dan como resultado aplicaciones variadas.

## **2.2 UNIÓN p-n**

El semiconductor tipo n cede electrones y el p cede huecos o gana electrones, el mecanismo de trabajo de estos semiconductores es sencillo al momento de utilizarlos para variadas aplicaciones.

Si se aplica corriente con dirección hacia el lado p, atrae los átomos libres de la última capa, alejándolos del enlace de manera que el cristal se opone al flujo electrónico. Si se aplica la corriente al lado n hace pasar electrones a través del enlace y estos fluyen.

Debido a que los semiconductores poseen bandas de energía, un aumento de temperatura excita a los electrones desde la banda de valencia hasta la banda de conducción y aumenta la conductividad; la conducción eléctrica se lleva a cabo debido a los electrones libres en la banda de conducción y a los huecos en la banda de valencia, para mejorar el desempeño de un material semiconductor existe el dopado o adición de impurezas.

La adición de impurezas o dopado sirve para promover el movimiento de electrones. El material dopado con donadores se llama de tipo n a causa de que la mayoría de portadores son electrones. Los dopados con aceptores se llaman de tipo p ya que acepta electrones; Ver Figura 4.

La conducción eléctrica en los semiconductores p y n cuando se unen, es debido a la difusión de huecos desde el tipo p hasta el tipo n, al mismo tiempo que los electrones se difunden en sentido opuesto, la movilidad de electrones y huecos es afectada por dos mecanismos principales de dispersión, por impureza y en la red; la movilidad por dispersión en la impureza es proporcional a la temperatura, mientras que la dispersión en la red es inversamente proporcional a la temperatura Ver Figura 5.

Cuando en una unión p - n la polarización es inversa, se crea un flujo de electrones que entra en el material del tipo n y un flujo de huecos en el material de tipo p que se aparta de la unión. Estas corrientes resultantes de la generación de los pares electrón - hueco son pequeñas. Polarizando en sentido directo hace mover los portadores mayoritarios hacia la unión recombinándose para crear una intensa corriente eléctrica.

Un diagrama Voltaje v.s. Corriente de una unión p - n se aprecia en la Figura 6. Donde se observan claramente las rupturas que pueden suceder dependiendo de la dirección de I y el sentido de la polarización. Las rupturas eléctricas se deben al proceso de avalancha, cuando se multiplican los pares electrón - hueco por colisión de los portadores de carga que se mueven rápidamente o por ruptura *zener*; que es un efecto túnel entre los dos extremos o caras de la unión. La ruptura suave o paulatina es indeseable en los semiconductores, ya que hay elevadas corrientes de polarización inversa a tensiones más pequeñas que la tensión de ruptura.

Los semiconductores toman varios nombres de acuerdo a la aplicación que estén realizando.

2.2.1 Rectificadores o Diodos. Convierte corriente alterna en directa pulsante, cuando a una unión p - n se le aplica una corriente con sentido hacia el lado n.

2.2.2 Transistor. Son pastillas con capas n - p - n o p - n - p, se le aplica un voltaje a la capa intermedia, aumentando el flujo de electrones a través de toda la unidad.



2.2.3 Varistores. Se usan para multiplicar frecuencias o estabilizar voltajes, aquí la resistencia es función del voltaje.

2.2.4 Termistores. Son materiales térmicamente sensibles utilizándose en controladores de temperatura, de nivel de líquidos, de flujos y otras funciones que son afectadas por la velocidad de transmisión del calor; de aquí se derivan los materiales termoeléctricos, los cuales generan energía a través de uniones p - n.

Cuando dos materiales termoeléctricos trabajan como bomba de calor, la carga eléctrica pasa a través de la unión absorbidora de calor, movilizada por electrones del tipo p y los portadores de cargas se alejan de la unión y acarrearán el calor, reduciendo así la temperatura en la unión. Invertiendo la polaridad se produce calor. Dentro de los materiales termistores podríamos mencionar:

2.2.4.1 Antimoniuro de Indio (InSb). Posee estructura cristalina cúbica con tres electrones de valencia por cada átomo de Indio. Se usa para detectores infrarrojos y para amplificadores galvanométricos.

2.2.4.2 Arseniuro de Indio (InAs). Tiene movilidad electrónica, se usa en termistores para convertir calor a corriente, debido a el notable aumento de electrones por incremento de la temperatura. Resiste hasta 815.6°C.

2.2.4.3 Fosfuro de Indio (InP). Posee movilidad electrónica buena y puede usarse en transistores a más de 315.6°C.

2.2.4.4 Seleniuro de Plomo (PbSe). La movilidad electrónica disminuye con la elevación de la temperatura y la resistividad aumenta; utilizándose en termistores.

2.2.4.5 Telururo de Bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ). Conserva sus propiedades de operación entre  $-45.6$  y  $204.4^\circ\text{C}$  que es el intervalo más útil tanto para refrigeración como para calefacción. Como semiconductor tipo p alcanza una eficiencia del 5.8% y soporta una diferencia de temperatura de  $620^\circ\text{C}$ , pero como tipo n la diferencia de temperatura que soporta es de  $250^\circ\text{C}$  pero la eficiencia es el doble. Esto lo convierte en candidato para el diseño de módulos termoeléctricos.

2.2.4.6 Telururo de Plomo (PbTe). Tiene una eficiencia de 13.5% y una diferencia de temperatura de  $600^\circ\text{C}$ , pero no se puede usar por debajo de  $167.7^\circ\text{C}$  y se utiliza para conversión del calor de desecho de los reactores atómicos a unos  $371.1^\circ\text{C}$ .

2.2.4.7 Arseniuro de Galio (GaAs). Tiene gran movilidad electrónica y puede ser utilizado como semiconductor.

2.2.4.8 Sulfuro de Cadmio (Cds). Se usa en células fotovoltaicas o baterías solares. Añadiéndoles isótopos radiactivos se convierten en baterías atómicas.

2.2.4.9 Telururo de Manganeso (MnTe). Con una diferencia de temperatura de hasta  $1000^\circ\text{C}$ , también ha sido usado como semiconductor.

2.2.4.10 Sulfuro de Cesio (CeS). Tiene buena estabilidad, buenas propiedades termoeléctricas a  $1093.3^\circ\text{C}$  y una alta diferencia de temperatura de  $1128^\circ\text{C}$ . Puede utilizarse como unidad de etapa elevada en dispositivos de conversión, es decir, transductores.

2.2.4.11 Telururo de Plata y Antimonio (AgSbTe). Posee alta eficiencia de conversión de energía de calor a corriente eléctrica y una conductividad térmica baja.

2.2.4.12 Antimoniuro de Cromo y Manganeso (CrMnSb). Es no metálico debajo de los 250°C pero si lo es por encima de ésta, originado por un fenómeno ferroeléctrico de conversión térmica análogo al ferromagnetismo.

Atendiendo que el Telururo de Bismuto es el material base que nos proporcionará mejores condiciones para ser utilizado en el módulo termoeléctrico aumentando sus propiedades eléctricas y térmicas para tener una cupla p - n se utiliza Antimonio para tipo p y Selenio para tipo n, ver Tabla 1.

Observando la tabla, tenemos que un semiconductor tipo p tiene menor conductividad térmica que el tipo n a una temperatura cualquiera. Entre varios semiconductores apropiados para módulos termoeléctricos vemos que se destacan el tipo n y p hechos con Telururo de Bismuto, por sus propiedades delante de los demás.

Respecto a su microestructura cristalina, presenta forma Hexagonal - Romboédrica, pero esto no influye para nada en su desempeño termoeléctrico. Para el proceso de manufactura de los materiales termoeléctricos se utiliza la compresión de polvos sinterizados o por solidificación del material fundido. De aquí son preparados generalmente en forma de lingotes de tamaño de grano grande donde la homogeneidad es un requerimiento importante porque la alta concentración de aleantes y dopantes tienen la tendencia a segregarse y/o a precipitarse. Lo anterior provocaría una baja del desempeño óptimo.

Un beneficio natural inesperado del  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  es su tendencia a cristalizar fácilmente con tamaño de grano largo en una sola dirección exhibiendo las mejores características de material termoeléctrico, el telururo de bismuto trabaja en rangos de temperaturas negativas hasta temperaturas mayores que cero. Ver Tabla 2.

## **2.3 TEORIA DE BOMBAS DE CALOR**

Desde el punto de vista de calefacción, la bomba de calor se encarga de proporcionar un calor para mantener un espacio cerrado a una temperatura más alta que la ambiental.

Estas bombas trabajan con ciclo invertido de potencia, que no es más que cambiar el recorrido del refrigerante a través del circuito del sistema de refrigeración convencional (compresión de vapor), dicho cambio se lleva a cabo mediante una válvula de inversión, la cual hace que el condensador cambie de función como evaporador y viceversa, logrando que se caliente el habitáculo que está frío. Con esto se presenta un cambio en las relaciones importantes del desempeño del equipo.

$$\text{COP refrigeración} = Q_a/W \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\text{COP calefacción} = Q_r/W \quad \text{Ecuación 3}$$

$Q_a$  = Calor absorbido

$Q_r$  = Calor rechazado

$W$  = Trabajo

Las máquinas térmicas se basan en el ciclo de Carnot que no es más que dos procesos

isentrópicos (entropía constante) y dos isotérmicos (temperatura constante), este ciclo es el de mayor rendimiento posible internamente y externamente reversible (ciclo ideal). Para el ciclo invertido se demuestra que el trabajo es el mismo que para un ciclo de energía, teniendo que ser el calor rechazado por el ciclo invertido a la temperatura más alta igual al calor añadido en el ciclo invertido debe ser el mismo que el rechazado en el ciclo de energía. El número llamado COP o coeficiente de performance se aplica a los ciclos invertidos para expresar el rendimiento de funcionamiento.

Con la Figura 7 se observará las relaciones importantes que dan lugar luego de un análisis del ciclo de Carnot de cualquier sustancia. Lo anterior indica que el calor se toma del depósito de calor y se añade a lo largo del proceso isotérmico, la sustancia se expande a lo largo de una sustancia isentrópica durante la cual no se añade ni se extrae calor, el calor es rechazado al depósito frío a temperatura constante y la sustancia se comprime isentrópicamente.

Cuando se va a refrigerar, el refrigerante se comprime isentrópicamente a lo largo de ab, desde una temperatura de frío  $T_1$  hasta otra  $T_2$ , mayor que la de un sumidero naturalmente disponible  $T_0$ . El sistema desecha calor a una temperatura constante  $T_2$  a lo largo de bc. Luego viene una expansión isentrópica, cd, bajando la temperatura hasta  $T_1$ , que es menor que la  $T_r$  del espacio refrigerado. El calor lo absorberá el refrigerante enfriándose el espacio, esto se observa en la trayectoria da.

Si el ciclo es para calefacción, la secuencia de operación es la misma que antes, variando claro está las temperaturas.  $T_2$  debe ser mayor que la temperatura  $T_r$  del espacio que se va a calentar pasando el calor del refrigerante al espacio. Además ahora la fuente de calor es un depósito naturalmente accesible (aire, pozos, lagos, etc.) que se denomina

sumidero. Para refrigerar debemos tomar el sumidero más frío y para calefacción el más caliente convenientemente.

En ambos casos el trabajo:

$$W = (T_2 - T_1) \cdot S \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\cdot S = S_a - S_d = S_b - S_c \quad \text{Ecuación 5}$$

$$Q_a = T_1(S_a - S_d) = T_1 \cdot S \quad \text{calor añadido al sistema desde el espacio frío.}$$

Ecuación 6.

$$Q_r = T_2(S_b - S_c) = T_2 \cdot S \quad \text{calor entregado al espacio que se calentará.}$$

$$\text{COP enfriamiento} = Q_a/W = T_1/(T_2 - T_1) \quad \text{Ecuación 7}$$

$$\text{COP calefacción} = Q_r/W = T_2/(T_2 - T_1) \quad \text{Ecuación 8}$$

Además de lo anterior existen deducciones importantes:

- El trabajo que viene del exterior debe ser mínimo, ya que demanda un gasto que debe pagarse.
- El trabajo se reducirá a medida que disminuye  $T_2$ .
- En refrigeración la temperatura más baja que se consiga  $T_0$  mediante un lago o atmósfera será la más económica. Por lo tanto hay un límite inferior natural para  $T_2$

fijado por  $T_0$ . En la practica  $T_2 - T_0 = 2.5$  a  $11^\circ\text{C}$ .

- En calefacción  $T_2 - T_r = 5.5$  a  $11^\circ\text{C}$ . De acuerdo a lo anterior surge la consideración económica con las áreas superficiales en los intercambiadores de calor ya que las diferencias de temperaturas mencionadas no deben ser menores porque se elevaría el costo de estas superficies.

-  $W$  se reducirá a medida que  $T_1$  aumente .

- En refrigeración es económico para el trabajo realizar el desalojo de calor del sitio a una temperatura tan alta como sea prácticamente posible.

- En calefacción  $T_1$  debe ser menor que alguna temperatura naturalmente disponible, consiguiéndose partes calientes durante el invierno. Pozos profundos o la propia tierra pueden ser la solución.

- Para límites particulares de temperatura, los intercambios de calor deberían tener lugar a  $T = \text{cte}$  para que la utilización del trabajo fuera más eficiente.

### **3 EFECTOS TERMOELECTRICOS**

#### **3.1 TERMOELECTRICIDAD**

No es más que la conversión directa de calor en electricidad o viceversa, en conductores sólidos o líquidos, llevados a cabo por intermedio de tres fenómenos; efecto Seebeck, Peltier y Thomson.

Los tres fenómenos son descritos en términos de tres coeficientes, Coeficiente de generación termoeléctrica  $S$ , Coeficiente Peltier  $\cdot$  y el Coeficiente Thomson, teniendo en cuenta que se tienen conductores homogéneos a temperatura constante; la combinación de resistividad eléctrica, conductividad térmica y termogeneración es suficiente para proveer una descripción completa de las propiedades de transporte electrónico en conductores para que la corriente y el calor sean funciones lineales.

Los efectos termoeléctricos tienen aplicaciones significativas en la ciencia y tecnología y muestra mucha importancia en un futuro no muy lejano; en aplicaciones prácticas como medida de temperaturas, generación de potencia, enfriamiento y calentamiento.

La termoelectricidad ha brindado a la ciencia espacial la versatilidad que dan los dispositivos termoeléctricos para operar en gravedad cero o muchas veces la fuerza de la gravedad de la tierra y operar en cualquier posición. La razón de la utilización de



semiconductores para la generación termoeléctrica es que poseen coeficientes de Seebeck más grandes que los metales, llevando a el desarrollo de estudios de las propiedades eléctricas tendientes a mejorar el desempeño de los ciclos termoeléctricos; en la Figura 8 se observan algunos dispositivos termoeléctricos.

3.1.1 Efecto Seebeck. Para una pequeña diferencia de temperatura entre dos materiales A y B, el voltaje desarrollado es proporcional a la diferencia de temperatura y es dada por la siguiente ecuación:

$$E = \alpha_{ab} \cdot T \quad \text{Ecuación 9}$$

$E$  = Voltaje desarrollado en el circuito abierto en Voltios.

$\alpha_{ab}$  = Coeficiente de Seebeck relativo (diferencia absoluta entre los coeficientes Seebeck a y b).

$T$  = Diferencia de temperatura entre las juntas de los materiales a y b.

En metales el coeficiente  $\alpha$  no excede 0.00005 Volt/°C en semiconductores disponibles para aplicaciones termoeléctricas desde 1966 el  $\alpha$  ahora está entre 0.0002 a 0.00025 Volt/°C. Ver Figura 11 de un modelo termoeléctrico típico.

3.1.2 Efectos Peltier. Se considera el mismo circuito anterior pero se induce una corriente  $I$  por intermedio de una batería. En la junta entre los dos materiales disímiles, el calor absorbido o rechazado en la unidad de tiempo es proporcional a la corriente que fluye y es dado por la siguiente ecuación:

$$Q = \alpha_{ab} \cdot I \quad \text{Ecuación 10}$$

$Q$  = Calor absorbido o rechazado en la unidad de tiempo en Watts.

$\cdot_{ab}$  = Coeficiente relativo de Peltier en materiales a y b

$I$  = Corriente directa que fluye en Amperios.

Lord Kelvin luego de un análisis termodinámico de cada circuito termoeléctrico concluyó  
:

$\cdot = \cdot T$  Ecuación 11

$T$  = Temperatura absoluta en °K.

Investigaciones en la física del estado sólido han demostrado que la refrigeración termoeléctrica es manifestación del bombeo de calor, que utiliza el cambio en los niveles de energía de los electrones para transportar energía térmica. Los electrones fluyen a través de una junta de dos materiales disímiles debido a materiales con diferentes niveles disponibles de energía, debe experimentar un cambio de energía que resulta en producción o absorción de calor, la dirección de la corriente determina que podrá ocurrir, si se enfría o si se calienta, Figura 9

Existen dos efectos adicionales que afectan el desempeño del circuito:

- Efecto Joule de calentamiento que ocurre a través de los dos materiales.
- Conducción de calor entre las dos uniones, una inevitable consecuencia de estar a diferentes temperaturas.

3.1.3 Efecto Thomson. Conocido también como efecto Lenz y es el caso contrario

al efecto Peltier donde se invierte el sentido de la corriente, para calentamiento, trabajando propiamente como bomba de calor.

#### 4 DESEMPEÑO DE LAS CUPLAS TERMOELECTRICAS

Una cupla termoeléctrica en un circuito de dos materiales disímiles representados por semiconductores tipo n y p donde el tipo n posee coeficiente de Seebeck negativo con exceso de electrones y el tipo p coeficiente Seebeck positivo con exceso de huecos; cuando la corriente tiene sentido hacia el semiconductor tipo n en la cupla se absorbe calor mientras que en el otro lado se rechaza calor, si la dirección de la corriente es invertida la cupla rechaza calor y en el otro lado se absorbe ver Figura 10.

El gradiente de temperatura entre las juntas fría y caliente no es lineal debido a la producción de calor por efecto Joule  $I^2R$ .

Por consideraciones de estado estable se realizan las siguientes suposiciones :

- Parámetros Seebeck, Resistividad y Conductividad Térmica de los materiales son independientes de la temperatura .
- Intercambio de calor entre la cupla y su alrededor ocurre únicamente en la junta fría y caliente.
- Resistencia eléctrica del cobre entre tiras y los contactos de los semiconductores es despreciable.

Cuando hay estado estable en la junta fría, el enfriamiento Peltier es igual al calor conducido debajo de la cupla desde el calor que se absorbe en el ambiente. Para mostrar esto tenemos la siguiente ecuación:

$$Q_i = \alpha T_c I - 0.5 I^2 R - C \Delta T \quad \text{Ecuación 12}$$

$Q_i$  = Rata de calor absorbido por la junta fría Watts.

$$\alpha = \alpha_p - \alpha_n$$

$$\Delta T = T_h - T_c \quad \text{Diferencial de temperatura entre p y n.}$$

$$R = R_n + R_p \quad \text{Resistencia eléctrica de la cupla.}$$

$$C = C_n + C_p \quad \text{Conductividad térmica de la cupla.}$$

La resistencia en las piernas de las cuplas son equivalentes a las calculadas como si se considerara un conductor cualquiera.

$$C_n = K_n (A_n / L_n)$$

$$C_p = K_p (A_p / L_p)$$

$K_p, K_n$  = Conductividades térmicas de las piernas en Watts/cm°C.

La potencia requerida para dar la rata de enfriamiento es igual a la caída de voltaje en el conductor más el voltaje por efecto Seebeck multiplicado por la corriente circulante.

$$W = I \cdot V = I(IR + \alpha \Delta T) \quad \text{Watts.} \quad \text{Ecuación 13}$$

El COP para un sistema termoeléctrico es el mismo que para un sistema de refrigeración convencional.

$$\text{COP} = \frac{Q_i}{W} = \frac{(T_c I - 0.5 I^2 R - C \cdot T)}{(I^2 R + \rho \cdot T I)} \quad \text{Ecuación 14}$$

Para maximizar  $Q_i$  es necesario que exista una geometría específica para las cuplas:

$$\frac{A_p L_n}{A_n L_p} = \sqrt{\frac{K_n \rho_p}{K_p \rho_n}} \quad \text{Ecuación 15}$$

$A$  = Area transversal de la pierna de la cupla.

$L$  = Longitud de la pierna de la cupla.

$\rho$  = Resistividad eléctrica.

Para maximizar  $\rho$  se necesita que  $I$  sea máxima.

$$d \rho / d I = 0$$

$$I_{\max} = \frac{\rho \cdot T}{(M - 1)R} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$\rho_{\max} = T_c \left[ \frac{M - T_h/T_c}{M + 1} \right] / (T_h - T_c) \quad \text{Ecuación 17}$$

$$M = \sqrt{1 + \left[ \frac{\rho^2}{(\sqrt{K_p \rho_p} + \sqrt{K_n \rho_n})^2} \right] \left[ \frac{T_h + T_c}{2} \right]} \quad \text{Ecuación 18}$$

Por lo tanto  $\rho_{\max}$  depende únicamente de  $\rho$ ,  $K$  y de la resistividad de los dos materiales que componen la cupla. " El valor de  $T_c / \rho \cdot T$  representa el coeficiente de desempeño de un proceso reversible". (Mayor del 100%)

Existe una expresión que reúne todos estos parámetros, la cual está referida a unas gráficas, dependiendo del material y son llamadas figuras de Merit o Mérito de la cupla y

se denota por  $Z$ .

$$Z = \frac{\rho}{\sqrt{[\sqrt{(K_p \cdot \rho)} + \sqrt{(K_n \cdot \rho)}]^2}} \quad \text{Ecuación 19}$$

Este término es el más completo referido a un material de propiedades termoeléctricas, donde es obvio que a mayor  $Z$  mejor desempeño de la cupla termoeléctrica, donde se necesita baja resistividad y baja conductividad térmica.

Realizando sucesivos reemplazos se obtiene una serie de fórmulas muy prácticas al momento de calcular cuplas termoeléctricas.

$$Q_i \text{ max.} = C[0.5ZT_c^2 - \rho \cdot T] \quad \text{Ecuación 20}$$

$$\rho \cdot \text{max.} = [0.5ZT_c^2 - \rho \cdot T] / (ZThT_c) \quad \text{Ecuación 21}$$

$$\rho \cdot T_{\text{max.}} = 0.5ZT_c^2 \quad \text{Ecuación 22}$$

$$Z = \rho / CR \quad \text{Ecuación 23}$$

Para lo anterior se hace necesario que las cuplas utilizadas sean de óptima geometría, para obtener los resultados esperados. El volumen de un material semiconductor utilizado en la fabricación de cuplas para una capacidad total de bombeo es independiente de  $A/L$  pero proporcional a  $L^2$ . Por lo tanto la cantidad de material necesario para construir un dispositivo termoeléctrico para una aplicación dada es fuerte función de la resistencia de contacto. Las curvas de Mérito dibujadas tienen en cuenta la resistencia de contacto como un factor donde la cantidad de  $A/L$  para cada cupla es igual para óptimo desempeño. En un semiconductor tipo p el  $Z$  es más alto que el del tipo n, pero el  $Z$  de la cupla es un promedio de los dos  $Z$ ; Ver Figura 11.

Como muchas máquinas existentes el módulo termoelectrico puede trabajar en Serie o en Paralelo.

#### **4 . 1 MODULOS TERMOELECTRICOS EN SERIE**

Se utilizan para incrementar el  $\Delta T$  entre  $T_h$  y  $T_c$  con el fin de obtener temperaturas más bajas que las que se consiguen con un módulo termoelectrico determinado; Ver Figura 12. A este arreglo se le conoce también como cascada.

#### **4 . 2 MODULOS TERMOELECTRICO EN PARALELO**

Se usan cuando se quiere incrementar el bombeo de calor, o hacer las veces de baterías en el efecto Seebeck para generar potencia.

Calcular un módulo termoelectrico para una determinada función existen tres métodos que vamos a desarrollar en el próximo capítulo utilizando como guía la gráfica del desempeño de un módulo termoelectrico típico, que es un módulo patrón de la empresa Cambion, Ver Figura 13.

#### **4 . 3 COMPARACION DEL SISTEMA TERMOELECTRICO Y SISTEMA DE COMPRESION DE VAPOR PARA REFRIGERACION**

Las analogías entre el sistema de compresión de vapor y el de refrigeración termoelectrica es valida, ya que ayuda en el entendimiento de los principios fisicos de operación fundamentados en el sistema termoelectrico y en el compresor para el sistema



por compresión de vapor.

La clave para el éxito de la operación de cada uno de los sistemas está en obtener un cambio en la energía interna en el lado caliente y frío del sistema. En el sistema de compresión de vapor esto es posible a través del uso de una válvula de expansión entre el condensador y el evaporador. Sin esta válvula el refrigerante pasaría a través de todo el sistema con una presión y entalpía uniforme y el bombeo de calor no ocurriría.

Lo mismo ocurriría en el sistema termoeléctrico si en el circuito los materiales n y p son idénticos, el nivel de energía del electrón, sería el mismo a través del sistema y entonces no habría bombeo de calor; si el diseñador selecciona materiales con diferentes niveles de energía disponibles, el electrón fluiría a través de la barrera o junta obligando a que ocurra un cambio de energía que resulta en la absorción o rechazo de calor en la junta, dependiendo de la dirección en el flujo de corriente.

Comparando el compresor y a la cupla termoeléctrica a lo largo del proceso de bombeo de calor, observamos las características de los sistemas, teniendo en cuenta la comparación de los parámetros que intervienen en el compresor y la cupla, Ver Figura 14.

De la Figura 14 se desprenden las siguientes comparaciones:

#### **Compresor**

- Pérdidas de gas por el pistón y válvulas

#### **Cupla Termoeléctrica**

- Conductividad térmica  $K$  da como resultado un retraso en el flujo de

calor.

- Pérdidas de capacidad de bombeo por fricción y otro factor como el sobrecalentamiento en la succión de gas en el compresor.

- Resistividad eléctrica  $\rho$  da pérdidas en  $I^2R$ .

- Capacidad de bombeo afectada por tolerancia en la cabeza del pistón.

- Potencia Termoeléctrica  $P = \frac{E}{T}$ .

- Eficiencia volumétrica es afectada por 1,2, y 3.

- Figura de Merit  $Z = \frac{S^2}{K}$ .

- Máxima diferencia de presión es afectada por la eficiencia volumétrica y presión de succión.

- Máxima diferencia de temperatura  $T_{max} = \frac{1}{2}ZTc^2$

Los parámetros importantes de diseño para la cupla termoeléctrica y el compresor son:

- El retraso de flujo de calor es debido a  $K$  en la cupla es similar al retraso del flujo de gas en el pistón del compresor por recirculación y pérdida por las válvulas.

- Las pérdidas por calor de Joule en la cupla son similares a las perdidas en la capacidad de bombeo en el compresor por fricción mecánica y otros factores como el sobrecalentamiento en la succión del gas en el compresor.

- Coeficiente relativo de Seebeck  $\frac{S}{T} = \frac{E}{T}$  dice la diferencia de entropía de los electrones en los dos materiales en contacto. Un concepto paralelo en el desempeño del

compresor es la capacidad de bombeo limitado únicamente por la pérdida por reexpansión por la tolerancia en la cabeza.

- La figura de Merit  $Z = \frac{1}{2} \frac{\Delta T}{T_c} \cdot K$  envuelve los tres parámetros que provocan 1, 2 y 3 y es similar al concepto de eficiencia volumétrica.

-  $\Delta T_{max} = \frac{1}{2} Z T_c^2$  que puede ser desarrollado sin carga. Es similar a la máxima diferencia de presión obtenible en un compresor, sin carga y depende de la eficiencia volumétrica y presión de succión.

Los módulos termoelectricos actualmente proveen a los sistemas eléctricos, un mejor manejo de la disipación del calor producido. Además puede calentar o enfriar componentes representando una buena herramienta que los ingenieros no pueden pasar por alto.

Las bombas termoelectricas son dispositivos sin partes movibles. Con una entrada de voltaje, se puede bombear calor en una cara del dispositivo a la otra. Está disponible en una variedad de figuras y tamaño, que provee frío a temperaturas debajo de la ambiental. Ver Figura 15.

Los dispositivos termoelectricos anteriormente fueron desarrollados por las autoridades aeroespaciales y militares, siendo costosos los desarrollos y variadas aplicaciones, haciendo perder el interés a la industria electrónica.

Las aplicaciones son variadas:

- Controlar temperatura sensitiva en amplificadores operacionales.
- Enfriar dispositivos de carga en detectores infrarrojos.
- Controlar temperaturas en afinadores de rayo láser.
- Mantener temperaturas en instrumentos de laboratorios médicos.
- Probar semiconductores (propiedades de la oblea a cambio de frío y calor).
- Enfriar microprocesadores y otros dispositivos operando en ambientes industriales donde hay altísimas temperaturas. Ver Figura 16.
- Aplicaciones en misiles y espaciales (sistemas de guía inercial, etc).
- Analizadores de polución ambiental.
- Refrigeradores portátiles.

Comparando con los sistemas electromecánicos de enfriamiento con actuadores on/off, proporcionalmente o servo-marcha los módulos proporcionan alta estabilidad en proporcionar temperaturas de enfriamiento y eléctricamente por trabajar con corriente directa.

Esto le proporciona un alto control en una variedad de ambientes porque se pueden administrar, suavemente la corriente de entrada o el voltaje. Además las unidades pueden trabajar a temperaturas arriba de 150°C o en vacío. Comparando con sistemas electromecánicos de enfriamiento, los módulos termoeléctricos combinan reducido tamaño y pese con gran disponibilidad de aprovechamiento.



## **1 CALCULO DE MODULOS TERMOELECTRICOS**

### **1.1 CALCULO POR Qc MAXIMO**

Qc, capacidad de enfriamiento del modulo en Watts, donde se toma como referencia el calor desalojado para enfriar como máximo y a partir de aquí se toman los demás valores en el gráfico de desempeño atendiendo principalmente a la corriente a que se produce el máximo Qc, minimizando el número de módulos.

### **1.2 CALCULO POR COP MAXIMO**

Con el COP máximo se busca minimizar la potencia eléctrica requerida para el funcionamiento del modulo termoeléctrico y reduciendo la necesidad de una mayor área disipadora de calor.

### **1.3 CALCULOS PRACTICOS**

Aquí es indispensable saber la disponibilidad de espacio, restricción de corriente o voltaje, para realizar el diseño.

Para efectuar el calculo se deben interpretar las gráficas de desempeño de los módulos termoeléctricos. Las curvas de desempeño térmico poseen cuatro variables : COP al lado izquierdo en %, Qc carga de calor, lado derecho en Watts, Corriente de operación en la horizontal en Amperios y  $\Delta T$  de trabajo del módulo que va a influir en las curvas que aparecen como la de COP y Qc.

Todo módulo para su mejor desempeño debe poseer superficies disipadoras de calor de lado y lado, ya que así desalojará el calor de una manera fácil del cual se ampliará próximamente en el diseño de las superficies disipadoras de calor.

Se hizo un cálculo de ejemplo con un objeto que genera 10 Watts de calor, al ser mantenido a una temperatura de 30°C o menos y la temperatura ambiental es 40°C.

Paso 1 : Carga total de calor, aquí se tienen en cuenta las pérdidas de calor, provenientes pueden ser del efecto Joule  $I^2R$  o por calor alrededor del objeto enfriado proveniente del ambiente. Pero en la práctica los factores más influyentes suelen ser la diferencia de temperatura entre el ambiente y el objeto que se está enfriando y el espesor de la superficie aislante. En general la pérdida de calor es inversamente proporcional a el aislamiento térmico pero linealmente proporcional a el área del objeto enfriado.

El intervalo de incremento depende principalmente de la magnitud de la diferencia de  $T_a$  -  $T_c$ .

$$Q_{ct} = Q_c + \text{perdidas} = 10 + 2 = 12 \text{ Watts.}$$

Ahora se calcula la temperatura base de la superficie disipadora de calor o radiador.

$$T_h = 40 + 10 = 50^\circ\text{C}$$

Los 10°C provienen de la experiencia en diseño de radiadores para delimitar que se produzcan un  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$  entre el lado caliente del módulo termoelectrónico y el ambiente.

•  $T_{TE} = T_h - T_c = 50 - 30 = 20^\circ\text{C}$  para la figura de desempeño del módulo patrón, Figura 17.

Ahora se sigue con el cálculo de los parámetros I, corriente de entrada; V, voltaje de entrada; P, potencia de entrada; Qh, calor rechazado y el número de módulos termoeléctricos necesarios.

Con las distintas formas de cálculo se puede hacer la escogencia adecuada, observando la Figura 17 para un módulo con las siguientes características:

Qc max. = 19 Watts

•  $T_{max} = 60^\circ\text{C}$

I<sub>max.</sub> = 9 Amperios

V<sub>max.</sub> = 4 Voltios

Número de cuplas = 31

- Cálculo por Qc máximo: Utilizar Figura 17.

•  $T = 20^\circ\text{C}$

Qc max. = 12 Watts

I = 9 Amp.

COP = 40%



$$P = Q_c / \text{COP} = 12.5 \text{ Watts} / 0.4 = 31.3 \text{ Watts}$$

$$V = P / I = 31.3 \text{ Watts} / 9 \text{ Amp} = 3.5 \text{ Voltios}$$

$$Q_h = Q_c + P = 12.5 \text{ Watts} + 31.3 \text{ Watts} = 43.8 \text{ Watts}$$

$$r = (T_h - T_a) / Q_h = 10^\circ\text{C} / 43.8 \text{ Watts} = 0.23 \text{ }^\circ\text{C/Watts} \quad \text{Resistencia térmica en el radiador.}$$

- Cálculo por COP máximo:

$$T = 20^\circ\text{C}$$

$$\text{COP max.} = 125\%$$

$$I = 2.3 \text{ Amp}$$

$$Q_c = 3.3 \text{ Watts}$$

$$\# \text{ módulos} = 12 \text{ Watts} / 3.3 \text{ Watts} = 3.6 \approx 4$$

$$P = Q_c * N / \text{COP} = 3.3 \text{ Watts} * 4 / 125 = 10.6 \text{ Watts}$$

$$V = P / I = 10.6 \text{ Watts} / 2.3 \text{ Amp} = 4.6 \text{ Voltios}$$

$$Q_h = Q_c * N + P = 3.3 \text{ Watts} * 4 + 10.6 \text{ Watts} = 23.8 \text{ Watts}$$

$$\bullet = (T_h - T_a)/Q_h = 10^\circ\text{C}/23.8 \text{ Watts} = 0.42^\circ\text{C}/\text{Watts}$$

- Cálculo por diseño práctico:

Se ha supuesto que se pueden colocar dos módulos en el espacio disponible.

$$Q_c = Q_{ct}/N = 12 \text{ Watts} / 2 = 6 \text{ Watts}$$

$$\bullet T = 20^\circ\text{C}$$

$$Q_c = 6 \text{ Watts} + 0.5 \text{ Watts} = 6.5 \text{ Watts}$$

$$I = 3.4 \text{ Amperios}$$

$$\text{COP} = 105\%$$

$$P = Q_c * N / \text{COP} = 6.5 \text{ Watts} * 2 / 1.05 = 12.4 \text{ Watts}$$

$$V = P/I = 12.4 \text{ Watts} / 3.4 \text{ Amp} = 3.6 \text{ Voltios}$$

$$Q_h = Q_c * N + P = 6.5 \text{ Watts} * 2 + 12.4 \text{ Watts} = 25.4 \text{ Watts}$$

$$\bullet = (T_h - T_a)/Q_h = 10^\circ\text{C}/25.4 \text{ Watts} = 0.39^\circ\text{C}/\text{Watts}$$

De lo anterior se concluye que resulta económico el cálculo por  $Q_c$  máximo en cuanto al número de módulos termoelectrónicos se refiere, ya que sólo se necesitaría uno y el radiador

tendrá una caída de la resistencia térmica menor con cada rata de calor rechazada mayor, es decir que irradiará calor más rápidamente.

Cuando se calcula por COP máximo se necesitaría un número mayor de módulos y el rechazo de calor  $Q_h$  será mayor, tanto que para obtener máximo beneficio de un calentamiento, de calcularía el módulo por COP máximo. Para las bombas de calor termoeléctricas se tiene a  $I_{max}$ ,  $V_{max}$ ,  $Q_c_{max}$ , como variables y se realizará el cálculo del módulo para la bomba.

## **1.4 SELECCION DEL MODULO TERMOELECTRICO PARA LA BOMBA DE CALOR**

Se puede realizar de dos formas:

- Por  $Q_c$  máximo tomando el módulo patrón y luego multiplicar por un factor para confrontar con los otros módulos que produce la Cambion.
- Con los datos tabulados para el desempeño del módulo patrón dependiendo de  $T_h$  y  $\Delta T_{TE}$ , se podrá encontrar  $I$ ,  $V$ ,  $Q_h$ ,  $P$ ,  $Q_c$ ,  $COP_R$  (efecto refrigerante) y  $COP_H$  (efecto calentador o de Thomson). La mayoría de los módulos tienen la gráfica de desempeño cuando  $T_h = 50^\circ C$  y depende de  $\Delta T_{TE}$ .

Las conversiones que deben ser realizadas para un módulo particular servirán para conocer los valores de  $Q_c$ ,  $V$ ,  $I$ ,  $P$ ,  $COP_R$  y  $COP_H$ .

$$Q_c = Q_c(\text{tabla}) * Q_c(\text{factor}) \quad \text{Ecuación 24}$$

$$I(\text{nuevo}) = I(\text{tabla}) * I_{\text{max}}(\text{nuevo modulo})/9 \quad (I_{\text{max}} \text{ del módulo patrón } 801 - 2001)$$

Ecuación 25

$$V(\text{nuevo}) = V(\text{tabla}) * N/31 \quad \text{Ecuación 26} \quad N = \# \text{cuplas nuevo módulo.}$$

El módulo patrón es 801 - 2001 - 01, el Anexo A mostrará las relaciones importantes entre todos los módulos producidos por Cambion.

En el Anexo B se observan las gráficas de desempeño del módulo 801 -2004 - 01 y sus características más importantes.

- El otro método es el de los cálculos por  $Q_c$  máximo, COP máximo y el de diseño práctico; luego de utilizar las fórmulas se tiene que en la Tabla 3 están las iteraciones para el cálculo del módulo por  $Q_c$  máximo.

## 2 DISEÑO DEL RADIADOR

Se disipará 143.7 Watts a través del radiador; se obtiene una expresión para calcular, el numero de aletas, espesor de aletas, área total. Para ello se tendrá en cuenta que hay una parte que se disipará por el aire y la otra por la aleta.

$$Q_i = Q_h = Q_{\text{aleta}} + Q_{\text{libre}} = hA_f \cdot \theta_o \cdot f + hA_L \cdot \theta_o \quad \text{Ecuación 27}$$

$$\theta_o = T_o - T_\infty \therefore \theta_o = \frac{Q}{hA_f \cdot f + hA_L} \cdot \frac{1}{(T_o - T_\infty)} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$f = f\sqrt{\frac{h}{Kt}} \text{ el que se obtendrá gráficamente} \quad \text{Ecuación 29}$$

$$A_o = A_{\text{total}} - \#aletas \cdot \text{base} \cdot \text{espesor} = A_t - Nbt \quad \text{Ecuación 30}$$

$$A_f = \#aletas \cdot \text{base} \cdot \text{longitud} \cdot 2 + \#aletas \cdot \text{base} \cdot \text{espesor} = Nb(2L + t) \quad \text{Ecuación 31.}$$

El calor que se desalojará por el radiador será el  $Q_h$  generado por el módulo y para cumplir con el propósito de aumentar la rapidez de transferencia de calor se diseñará el radiador para un exceso del 30% de  $Q_h$ .

La caída de temperatura que resultará en el radiador es suficiente para no sobredimensionar y se utilizará la convección forzada para desalojar el resto del calor,

que no sale completamente por conducción en la aleta. Atendiendo a lo anterior se obtiene:

$$Q_h = 143.7 \text{ Watts} * 3.41 \text{ Btu}/(\text{Watts hr}) = 488 \text{ Btu/hr}$$

$$T_o = T_h = 50^\circ\text{C} = 122^\circ\text{F}$$

$T_\infty = 32^\circ\text{C} = 90^\circ\text{F}$  reemplazando en la Ecuación 28

$$\begin{aligned} Q_t &= 5[\text{Btu}/\text{pie}^2\text{hr}^\circ\text{F}] (A_o + A_f \cdot f) (122 - 90)^\circ\text{F} \\ &= 160 (A_o + A_f \cdot f) \text{Btu/hr pie}^2 \end{aligned} \quad \text{Ecuación 32}$$

Se supondrá área total paso se tendrá en cuenta  $\cdot$  que es la caída de temperatura que otorgará si se fabrica con aluminio. La empresa Cambion recomienda que cuando  $\cdot = 0.07 - 0.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Watts}$  se necesita convección forzada para mejorar la transferencia de calor utilizando un ventilador. En la Tabla 4 se observan las iteraciones realizadas con las ecuaciones de 28 a 32.

El desempeño de una cupla termoeléctrica se semeja a un abomba de calor dado que cuando se induce corriente directa a la cupla una junta absorbe calor, y la otra rechaza calor, esto ocurre simultáneamente ocurriendo bombeo de calor propiamente dicho. Se tiene en cuenta que el módulo termoeléctrico consume potencia debido a la corriente, el calor debe ser removido desde el módulo para que trabaje eficientemente. Por lo tanto el flujo de calor debe ser removido rápidamente, por eso se utilizan los dispositivos de calor o radiadores.

El radiador es considerado como parte integral de los sistemas de refrigeración termoeléctrica y su desempeño se toma en cuenta para todos los diseños de sistemas. El flujo total de calor a través del módulo  $Q_h$ , puede ser expresada por la ecuación:

$$Q_h = P + Q_c$$

Un radiador ideal debe ser capaz de absorber una cantidad infinitas de calor sin subir la temperatura, esto no es posible en la práctica, porque el radiador se diseña para absorber el calor total deseado desde los módulos termoeléctricos y no subir en un nivel tolerable la temperatura. La caída de temperatura tolerable varía con la aplicación pero la capacidad de bombeo de un módulo termoeléctrico decrece cuando  $\Delta T$  aumenta.

El desempeño de un radiador puede ser especificada por su resistencia térmica ( $\theta_s$ ) donde:

$$\theta_s = \frac{\text{Caída de temperatura arriba de la temperatura ambiente } ^\circ\text{C}}{\text{Calor total disipado por el radiador Watts}}$$

Para sistemas de convección forzada  $\theta_s$  está entre  $0,07 \text{ } ^\circ\text{C/Watts}$  a  $0,5 \text{ } ^\circ\text{C/Watts}$

Para convección natural está entre  $0,6 \text{ } ^\circ\text{C/Watts}$  y  $5 \text{ } ^\circ\text{C/Watts}$ .

Los métodos de convección forzada o líquida son fuertemente recomendados por todos los casos pero los de convección natural no son tan eficientes.

La Cambion recomienda que los radiadores estén dentro de estos rangos.

Tamaño del Radiador	Flujo de aire	•s
4.38 x 5 x 1.38"	55 CFM	0,17 °C/Watts
4.38 x 8 x 1.38"	43 CFM	0,13 °C/Watts
4.75 x 8.5 x 1.38"	75 CFM	0,095 °C/Watts

Los datos de resistencia térmica mostrados están basados en aire quieto y un incremento o decrecimiento causa cambio en el valor de •s.

Ahora a continuación se calcula que tan eficiente es el radiador suponiéndose condiciones de trabajo.

## 2.1 INSTALACION DE MODULOS TERMOELECTRICOS EN RADIADORES

Los módulos termoeléctricos se fabrican con materiales duros favoreciendo su fragilidad y pueden ser dañados por la aplicación de esfuerzos excesivos. Por ello no deben ser fabricados como soportes de esfuerzos en ensambles.

Existen tres métodos de instalación; el método de apriete entre un radiador y el módulo, el método de soldadura y el método de epóxico, donde el radiador se sitúa en el lado caliente del módulo. El método de apriete y de soldadura son generalmente preferidos al momento de instalar módulos termoeléctricos. El método de unión con epóxico no debe usarse cuando se opere bajo condiciones de vacío.

2.1.1 Método de Apriete. Se realiza en los siguientes pasos.

- Las superficies instaladas en cada lado de un módulo deben ser apretadas a los lados planos con una tolerancia de  $\pm 0.001$ ".
- Limpiar la cara del módulo librándola de suciedades.
- Si más de un módulo va a ser utilizado en el ensamble todos los módulos deben ser separados conjuntamente una tolerancia entre 0.002".
- Untar una pequeña capa de Oxido de Zinc en una base de silicona (grasa de silicona) y



coloque el módulo en el radiador, la grasa debe aplicarse uniformemente haciendo presión hacia abajo, moviendo de cara a cara, hasta quedar una leve resistencia como revestimiento y el exceso de grasa saldrá cuando se apriete finalmente. Lo anterior se realiza para aumentar la rapidez de transferencia de calor, en las caras del módulo.

- Atornille el módulo al radiador utilizando tornillos de acero inoxidable 4 - 40 o 6 -32 con arandelas. Para asegurar que la presión aplicada a la superficie del módulo apriete todos los tornillos a mano y entonces se continúa apretando alternadamente en un patrón cruzado empezando con el que esté en el centro primero si existe. Repita esto aumentando gradualmente el torque cada vez hasta que quede ajustado pero no apretado. Máxima carga de compresión hacia el módulo debe ser de 15psi.

#### 2.1.2 Método de Unión Epóxica.

- Limpie y desengrase la superficie del radiador.

- Unte en la cara caliente del módulo una pequeña capa de epóxico térmicamente conductivo como Wakefield "Delta Bond 152".

- Coloque el módulo en el radiador y mueva de cara a cara hasta sentir una leve resistencia y el sobrante de epóxico salga.

- Coloque un peso o apriete el módulo hasta que el epóxico esté curado.

#### 2.1.3 Método de Soldadura.

Este es el método más delicado de todos ya que se corre con el riesgo de dañarlo, debiéndose tener un control de temperatura para prevenir el sobrecalentamiento del módulo aproximadamente en 120°C.

- Limpiar la superficie del radiador de grasa y remover materias extrañas, la zona debe ser soldable por ejemplo cobre o aluminio con una capa de plata.

- Estañar el área del módulo en el radiador con un caudín a baja temperatura con un punto de fusión debajo de 125°C. Caliente el radiador de 120°C a 130°C, aplique fundente a las patas de cobre en el módulo lado caliente y coloque el módulo en la posición estañada. Mueva el módulo levemente en un patrón circular y luego de pocos segundos, el exceso de fundente en la superficie soldar en forma vaporizada.

NOTA : Ninguna resistencia significativa en el movimiento del módulo en el radiador indica insuficiente soldadura. Esto se corrige removiendo el módulo y agregando soldadura adicional a el radiador.

- Deje enfriar el ensamble y remueva exceso de fundente.

### **3 DISEÑO Y DESARROLLO DE LA BOMBA DE CALOR TERMOELECTRICA**

La bomba de calor termoeléctrica es un equipo ideado para familiarizar a los usuarios con las variables involucradas con la termoelectricidad y su influencia en los procesos de Thomson, Peltier, Seebeck y el efecto refrigerador. Esta familiarización conlleva dos aspectos: La descripción de los componentes del equipo y el funcionamiento en sí en condiciones estables de operación.

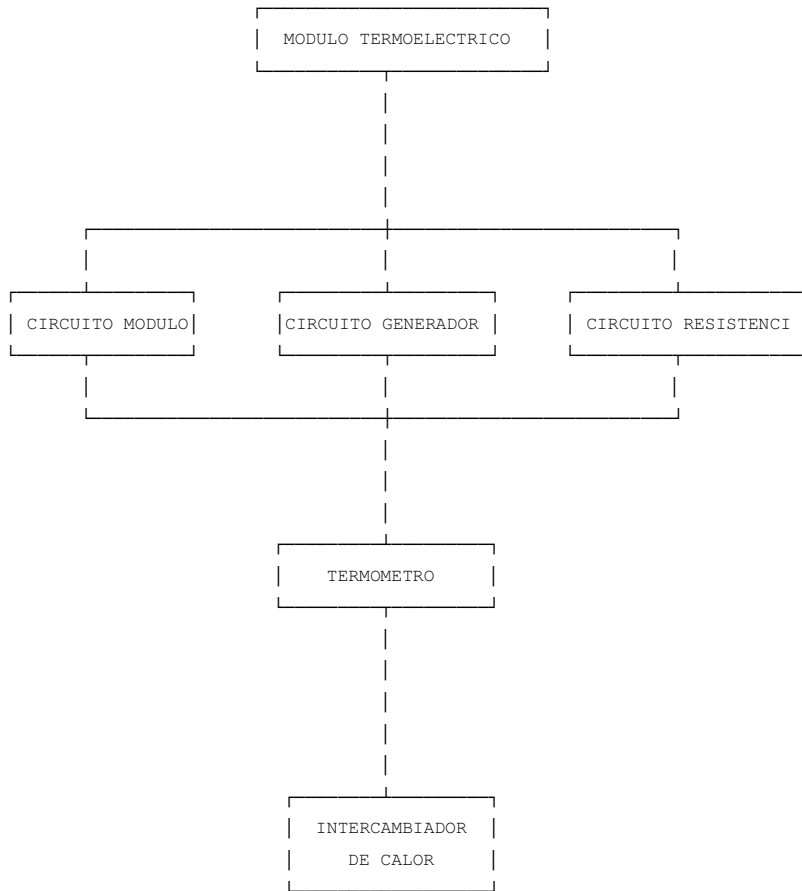
En este capítulo se explicaran los conceptos involucrados en el diseño y desarrollo de este equipo, comenzando con una descripción estructural y desarrollada del mismo, describiendo las principales consideraciones de diseño.

#### **3.1 ESTRUCTURA GENERAL DE LA BOMBA TERMOELECTRICA**

La bomba de calor termoeléctrica presenta una estructura sencilla, donde se han agrupado elementos para una determinada función, dependiendo del efecto a realizar.

Se han organizado los dispositivos en forma similar a un organismo, en el que hay una cabeza principal que dirige las acciones tendientes a alcanzar unos objetivos específicos.

## ORGANIGRAMA DE LA BOMBA TERMOELECTRICA



Este organigrama tiene como eje controlador al módulo termoelectrico como corazón del equipo ya que en el se concentran todas las características necesarias para realizar las experiencias. Se distinguen:

**Circuito Módulo:** Es el circuito eléctrico que traduce las señales eléctricas que han sido enviadas para observar los efectos termoelectricos; componiéndose de voltímetros, amperímetros, interruptor conmutador; conjuntamente opera con el circuito resistencia eléctrica para el efecto refrigerador. Este circuito necesita de un reostato para variar la señal eléctrica que entra en el módulo termoelectrico.

**Circuito Generador:** Es el que se encarga de captar la respuesta que da el módulo termoelectrico al ser sometido aun  $\cdot T$ ; se compone de un voltímetro, amperímetro y bombillo. Este último muestra que tan efectivo puede ser el módulo termoelectrico como generador de energía. Aquí se necesita de reostato sólo del interruptor para conmutar hacia la operación del módulo como generador.

**Circuito Resistencia:** Es el encargado de tomar las medidas eléctricas dadas por la señal que entra en la resistencia eléctrica necesitando de un reostato, voltímetro, amperímetro e interruptor conmutador.

**Termómetros:** Tomarán las temperaturas del lado frío y caliente del módulo termoelectrico.

**Intercambiador de calor:** Se encarga de desalojar el calor del lado caliente del módulo termoelectrico y lo conforma un radiador habitáculo para el módulo termoelectrico, resistencia y los termómetros. Es necesario el uso de un ventilador para aumentar la

rapidez de transferencia de calor.

### **3.2 CONSIDERACIONES DEL DISEÑO**

La bomba de calor termoeléctrico está diseñada con una configuración externa que facilite la interacción usuario-equipo para que observen y mantengan la atención en los datos que arrojen los instrumentos.

El usuario debe tener control permanente sobre toda acción que realice con el equipo. El equipo está configurado para que el usuario no tenga que memorizar secuencias, ni posiciones en los interruptores para realizar las experiencias, la arquitectura del equipo muestra claramente, que hay:

- Elementos visuales. Estos son los encargados de facilitar la interacción entre el usuario y el equipo como son los instrumentos de carátula, que son analógicos y los termómetros para ver cambios de temperatura.
- Elementos controladores. Son los encargados de variar la entrada de la señal eléctrica en el módulo termoeléctrico y en el elemento generador, en este caso reostato.
- Elementos conmutadores. Son los encargados de permitir el trabajo de los diferentes circuitos que realicen los efectos de Seebeck, Thomson, Peltier y refrigerante.
- Elementos internos. Se distinguen módulo termoeléctrico, generador (resistencia eléctrica), ventilador y circuitos eléctricos.

El equipo tiene la siguiente configuración externa. Ver Figura 18.

La bomba de calor opera de forma tal que cuando se realice experiencias con el módulo trabaja el circuito módulo para el efecto Peltier con polaridad directa y efecto Thomson con polaridad invertida, utilizando el reostato. Existen dos interruptores que en una posición trabajen en Thomson y en Peltier, dejando de trabajar los otros circuitos.

El circuito generador opera como circuito abierto para captar la señal producida por el módulo que se comporta como una termocupla y encender la bombilla como consumidora de la potencia generada. Existe un interruptor que en una posición trabaja como circuito abierto es decir, efecto Seebeck y en circuito cerrado para operar el circuito módulo.

El circuito resistencia produce el calor necesario para que lo absorba el módulo termoeléctrico; es necesario un reostato para variar la señal de entrada y un interruptor que conmute para trabajar la resistencia eléctrica o no opere, en el caso de operar el circuito módulo.

La protección del equipo está a cargo de un interruptor principal colocado en la línea a 110 V con indicador del voltaje de entrada al equipo que necesita de un rectificador a corriente directa para el módulo termoeléctrico, y un fusible para sobrecarga.

Hay la necesidad de un interruptor que conmute en efecto Peltier/Thomson o en efecto refrigerador, que incluye el funcionamiento del circuito resistencia. Haciendo referencia a estos interruptores hay que utilizar interruptores de varios codillos (patas o conectores), los que permiten conectarse de forma tal que se pueda conmutar para trabajar un circuito

u otro, minimizando el número de interruptores a utilizar, es decir varios en uno solo.

La configuración muestra que hay:

- El circuito eléctrico está hecho con cables de calibre 16 y 18 AWG de diferentes colores para facilitar la identificación de los distintos circuitos de Peltier, Seebeck y Calentador.

- Existe un transformador de 120/15 Voltios.

- El rectificador para corriente continua es de onda completa y a 15 Amperios.

- Reostato para el calentador 60 • - 100 Vatios.

- Reostato para el módulo 70 • - 120 Vatios.

- Interruptores:

Nº 1 es un multipolar de 12 clavijas (Normal - Seebeck)

Nº 2 es un multipolar de 12 clavijas (Peltier - Lenz)

Nº 3 es un multipolar de 9 clavijas (Normal - Generador)

Nº 4 es un multipolar de 9 clavijas (Off - On)

Nº 5 es un multipolar de 6 clavijas (Normal - Medida Seebeck/10)

- Voltímetros

1 de 15 Voltios DC (calentador)

1 de 1.5 Voltios DC (generador)

1 de 25 Voltios DC (modulo Peltier) ó (2,5 Voltios DC Seebeck)

1 de 300 Voltios AC (Línea)

- Amperímetros

1 de 5 Amperios DC (Calentador)

1 de 250 miliamperios DC (Generador)

1 de 5 Amperios DC (Módulo)

- Calentador:

Alambre de cromo níquel 50 Watt

- Termómetros

Lado frío : -20° a 100°C

Lado caliente: -10 a 110°C

- Bombillo de 1.1 •.

Refiriéndose al equipo hay que tener las siguientes precauciones:

- No mojar el equipo por riesgo de descargas eléctricas.

- No exceder de la capacidad de la resistencia eléctrica, no del módulo termoelectrico, operando a temperatura máxima de 100 °C.

- Mantener refrigerado permanentemente el radiador del módulo.



- No someter a golpes ni excesivas presiones al módulo termoeléctrico por su fragilidad.
- Esperar hasta que el módulo alcance la temperatura ambiente antes de cada experiencia.

### **3.3 POTENCIA DE SUMINISTRO Y CONTROL DE TEMPERATURA PARA DISPOSITIVOS TERMOELECTRICOS**

Los dispositivos termoeléctricos operan con corriente directa y los requerimientos de potencia son usualmente rigurosos o precisos. Para algunas aplicaciones, potencia no regulada DC con un componente de rizo de un 10% o menos es satisfactorio y esto es posible también con altos niveles de corriente alterna para ciertos usos no críticos. De hecho, porque los rizados de corriente alterna pueden degradar el desempeño del módulo por lo tanto se recomienda un comportamiento de rizo que limite de 10% o menos.

En los circuitos típicos para suministro de potencia se aprecia el uso de diodos y capacitores en distintas configuraciones y estos métodos son típicamente llamados "lazo abierto" o "lazo cerrado". Con el de lazo abierto, el ajuste manual o corriente de entrada es hecho normalmente por un promedio de suministro de potencia variable y la temperatura es mantenida razonablemente cerca del voltaje deseado.

Con el método del "lazo cerrado", un sensor de temperatura como una termocupla termistor, o RTA es utilizado para detectar la temperatura del módulo y un control electrónico automático controla la corriente de entrada. Este método es más costoso que el lazo abierto. Ver Figuras 19 y 20.

Un termostato cuando un control no altamente correcto de la temperatura. Si un

termostato es utilizado, como lo indica la Figura 21 debe ser para un frecuente y completo on/off de la corriente de entrada. Esto fue hecho de tal manera que cuando un termostato es utilizado en la forma convencional, una falla prematura del módulo puede suceder debido a las repetidas expansiones y contracciones producidas por el diferencial abierto/cerrado, en el circuito mostrado se observa que el termostato limita la corriente hasta que abre calibrando a una corriente predeterminada. En este punto la resistencia es efectivamente puesto en serie con el módulo y la corriente de entrada es limitada a un bajo nivel.

La Empresa CAMBION recomienda no utilizar control on/off ya que el circuito alternará completamente OFF y completamente ON por extendidos períodos de tiempo. En cambio un control lineal o proporcional es recomendado para proporcionar controles rigurosos de temperatura en sistemas termoeléctricos ofreciendo 100.000 horas o más para aplicaciones. Ver Anexo C para el circuito final de la bomba de calor termoeléctrica.

## 4 DISEÑO DE LA INSTRUMENTACION

### 4.1 CALCULO DE RESISTENCIAS SHUNT PARA EL BANCO DE PRUEBAS

La necesidad de utilizar la resistencia Shunt es debido a que las escalas nominales de trabajo para el proyecto no cumplen con muchas de las que se encuentran en el comercio. La palabra Shunt, significa derivación, es decir, que permite el paso de una pequeña proporción definida en la corriente o voltaje del circuito a través de la bobina de medición. El principio de funcionamiento es sencillo, dado a que la bobina que posee una más alta resistencia al paso de la corriente eléctricas que el Shunt, la mayor parte de la corriente se desviará por éste y únicamente pasará por la bobina una mínima parte.

En el caso de un amperímetro se tiene:

La resistencia del shunt depende de la medida que se necesite y viene determinado en escala del amperímetro, bastaría con cambiar el Shunt, ya que la bobina sería la misma, por ejemplo si tenemos una escala de 0 a 10 y necesitamos medir hasta 100 amperios.

Existe una ecuación que nos ayuda al cálculo de la resistencias del shunt:

$$R_p (\bullet) = R_G(\bullet) \frac{I_G (\mu A)}{I_M(\mu A) - I_G (\mu A)} \text{ Ecuación 33}$$

$R_p$  = Resistencia shunt

$R_G$  = Resistencia del galvanómetro

$I_G$  = Valor del fondo de escala del galvanómetro

$I_M$  = Corriente que quiere medirse.

Por ejemplo se dispone de un galvanómetro de 50 mA de fondo escala ( $I_G = 50 \mu A$ ) con resistencia interna de  $2k \cdot$  ( $R_G = 2 K \cdot = 2000 \cdot$ ) y con el se desea medir una corriente de 100 mA ( $I_M = 100 \mu A = 100000 MA$ ) la resistencia shunt en paralelo es:

$$R_p = 2000 \frac{50}{100000 - 50} = 1,0005 \cdot = 1 \cdot$$

Es importante aclarar que los amperímetros a utilizar para el efecto Peltier, Thomson y Seebeck, trabajan con corriente continua por lo que el amperímetro debe ser de bobina móvil; por su mayor precisión. Ver Figura 22.

En el caso del voltímetro se tiene:

Teniendo en cuenta que el voltímetro necesita que durante la medida de la tensión, circule una débil corriente por el aparato siendo indispensable una resistencia de precisión y alta estabilidad, pues su función primordial es la de convertir una tensión entre dos puntos en una tensión proporcional a ella haciendo que la corriente máxima que es capaz de medir el voltímetro, cuando la aguja alcanza el final de la escala.

La resistencia shunt que debe colocarse en serie con el galvanómetro se calcula con la siguiente ecuación:

$$R_s (K \cdot) = \frac{V_m(V)}{I_G (mA)} - R_G (K \cdot)$$

$R_s$  = Valor resistencia serie

$V_M$  = Tensión que desea medirse

$I_G$  = Valor del fondo de escala del galvanómetro

$R_G$  = Resistencia del galvanómetro utilizado

Por ejemplo se dispone de un galvanómetro  $I_G$  (50 mA = 0,05 mA  $R_g = 2 K \cdot$  y se desea medir 300 V a fondo de escala.

$$R_s = \frac{300}{0.05} - 2 = 5.998 \cdot = 6M \cdot$$

Ver Figura 23.

La sensibilidad del voltímetro debe ser más rigurosa que un amperímetro, es decir, por cada voltio que resistencia ofrece en ohmios es decir:

$$\text{Sensibilidad} = \frac{R_s + R_G}{V_M} = \frac{6000 K \cdot + 2K \cdot}{300 V} = \frac{6002 K \cdot}{300V} = 20.08 K \cdot /V$$

A mayor sensibilidad mayor exactitud en la medida.

## **5 GUIA DE LABORATORIO**

Como se observa a través de este proyecto, que son variadas las aplicaciones de los dispositivos termoeléctricos, es esencial que los estudiantes estén enterados del uso de esta tecnología alternativa y sus capacidades.

### **5 . 1 COMPONENTES DE BOMBA DE CALOR TERMOELECTRICA**

Panel:

Hecho en lámina galvanizada calibre 18, pintada de color verde

Ensamble Módulo Termoeléctrico:

El módulo se encuentra entre dos bloques de aluminio; para el lado frío pesa 30 gr y el lado caliente 55 gr para favorecer la absorción de calor, con dos orificios para los termómetros. El lado caliente está sujeto a un radiador que está en contacto con un ventilador y hay una resistencia calentadora para el lado frío. Hay una carcasa en acero inoxidable forrada con baquelita para disminuir el calor hacia afuera producido por la resistencia calentadora, las caras en contacto con el módulo se untan de grasa de silicona.

Interruptores de Control

1 Interruptor de líneas iluminado 120 V

5 Interruptores multipolares, a baja voltaje que posean unos led indicadores del efecto

que está trabajando para familiarizar más al estudiante.

#### Reostatos

2 Reostatos de plumillas de plata.

#### Bombillo de Carga

Utilizado para ilustrar el uso de módulos termoeléctricos como generador de potencia.

#### Instrumentación

##### Temperatura:

2 Termómetros de mercurio

1 Rango de -10 a 110°C

1 Rango de -20 a 100°C

##### Voltímetros

##### Rango

1 de 15 voltios DC (Calentador)

1 de 1.5 voltios DC (generador)

1 de 25 voltios DC (módulo Peltier) ó (2,5 Volt DC Seebeck)

1 de 300 voltios AC (Línea)

##### Amperímetros

##### Rango

2 de 0 ---> 5 Amperios

1 de 0 ---> 250 mA

Protección

Fusible por sobre carga en A.C.

## **5.2 OPERACION**

### 5.2.1 Procedimientos.

- Encienda el interruptor principal para activar transformador y ventilador.
  
- Asegúrese que los termómetros estén instalados en sus habitáculos, y correspondan a los rangos de los lados fríos y caliente.
  
- Asegúrese que los reostatos estén girados totalmente a la derecha (mínima potencia de entrada) antes de empezar algún experimento.
  
- Observe que en el panel los interruptores numerados, para posicionar debidamente cada uno, según el experimento requerido.
  
- Gire los reostatos para incrementar el suministro de potencias a el módulo calentador a ambos en el procedimiento. Las temperaturas necesitan de tiempo hasta que se estabilicen después de cada incremento en potencia y es recomendado hacer incrementos regulares en todo el rango de los reostatos.
  
- No exceda en el módulo de temperatura de 120°C ya que podría ablandar las soldaduras de las cuplas, hay que tener constante observación de este parámetro en todas



las experiencias.

- Al final de cada experiencia gire los reostatos completamente en sentido horario para reducir la potencia a un mínimo. Si va hacer otra experiencia cerciorese que el módulo se enfríe hasta la temperatura del cuarto o ambiente para evitar choques eléctricos.

Nota: El módulo es enfriado por aire, resulta que los experimentos dependen de la temperatura ambiente  $T_a$ .

### **5.3CAPACIDAD DE EXPERIMENTOS**

- Investigar de los efectos sobre la temperatura de la superficie de una u otra cara del módulo con incremento de potencia (efecto Reltier).

- Investigación de los efectos sobre la dirección de la transferencia de calor revirtiendo la polaridad del suministro de potencia a el módulo (efecto Thomson o Lenz).

- Investigación de la variación en circuito abierto a través del módulo debido a la variación de la diferencia de temperatura en las caras (efecto Seebeck).

- Investigación del desempeño de la potencia generada con carga estable e incremento de la diferencia de temperatura.

- Estimación del coeficiente del desempeño del módulo cuando actúa como refrigerador.

#### **5.3.1 Notas Generales.**

Antes de usar la bomba asegúrese de:

- Estudiar la unidad e identificar todos los interruptores y controles.
- Entender la función de los controles e interruptores.
- Tener precauciones con los límites de temperatura.

A continuación se tienen las guías de los efectos a realizar en el equipo.

1. Investigación de los efectos sobre la temperatura de la superficie de una u otra cara del módulo con incremento de potencia (efecto Reltier).

Procedimiento:

- Asegúrese que el interruptor principal está apagado.
- Gire los reostatos completamente en sentido horario.
- Coloque el interruptor:
  - 1 a Normal
  - 2 a Peltier
  - 3 a Normal
  - 4 a Apagado
  - 5 a Normal
- Coloque el interruptor principal en encendido
- Incremente la potencia de entrada a el módulo termoeléctrico en incrementos de temperatura luego de estabilizarse cada incremento.
- Anotar en la Tabla  $V_m$ ,  $I_m$   $T_h$  y  $T_c$  cuando se estabilicen las temperaturas.
- Observe y analice, los resultados y grafique.

2. Investigación de los efectos sobre la dirección de la transferencia de calor revirtiendo la polaridad del suministro de potencia a el módulo (efecto Thomson o Lenz).

### Procedimiento

- Asegúrese que el interruptor principal está apagado.
- Gire los reostatos completamente en sentido horario.

- Coloque el interruptor

1 a Normal

2 a Lenz

3 a Normal

4 a Apagado

5 a Normal

- Coloque el interruptor principal en encendido

- Incremente la potencia de entrada a el módulo termoeléctrico en incrementos de temperatura luego de estabilizarse cada incremento.

- Anotar en la Tabla  $V_m$ ,  $I_m$   $T_h$  y  $T_c$  cuando se estabilicen las temperaturas.

- Observe y analice, los resultados y grafique.

3. Investigación de la variación en circuito abierto a través del módulo debido a la variación de la diferencia de temperatura en caras (efecto Seebeck).

Procedimiento:

- Asegúrese que el interruptor principal está apagado.

- Gire los reostatos completamente en sentido horario.

- Coloque el interruptor:

1 a Seebeck

2 a Peltier

3 a Normal

4 a Encendido.

5 a Medida Seebeck/10

- Coloque el interruptor principal en encendido.

- Incremente la potencia de entrada a la resistencia en incrementos de temperatura después de estabilizarse.

- Anotar en la Tabla  $T_h$ ,  $T_c$  y  $V_m$  cuando las temperaturas se estabilicen.

- Observe y analice, los resultados y grafique.

4. Investigación del desempeño de la potencia generada con carga estable e incremento de la diferencia de temperatura.

Procedimiento:

- Asegúrese que el interruptor principal está apagado.
- Gire los reostatos completamente en sentido horario.

Coloque el interruptor:

- 1 a Normal
- 2 a Peltier
- 3 a Generador
- 4 a Encendido
- 5 a Normal

- Coloque el interruptor principal en encendido.

- Incremente la potencia de entrada a el calentador en incremento de temperatura luego de estabilizarse en cada incremento.

- Anotar en la tabla  $V_m$ ,  $I_L$ ,  $T_h$  y  $T_c$  cuando se estabilicen las temperaturas.

- Observe y analice los resultados y grafique.

5. Estimación del coeficiente de desempeño del módulo cuando actúa como refrigerador.

Procedimiento:

- Asegúrese que el interruptor principal está apagado.
- Gire los reostatos completamente en sentido horario.

- Coloque el interruptor

1 a Normal

2 a Peltier

3 a Normal

4 a Encendido

5 a Normal

- Incremente la potencia de entrada en el calentador y módulo simultáneamente e incrementos tal que el lado frío esté manteniendo las condiciones ambientales. Aquí se asume que todo el calor es absorbido por el módulo en este caso y no hay pérdida al exterior.

- Anote en la tabla  $T_h$ ,  $T_c$ ,  $I_m$ ,  $V_m$ ,  $I_L$ ,  $V_L$  cuando se estabilicen las temperaturas.

- Observe y analice, los resultados y grafique.

A continuación se observa la Tabla para la recolección de datos y las experiencias típicas que se pueden realizar con este equipo y las gráficas de cada una de ellas.

#### **5.4 ANALISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS CON LA BOMBA DE CALOR TERMOELECTRICA**

Efectos Peltier:

A Mayor diferencia de temperatura  $\Delta T$ , se obtiene menor temperatura  $T_c$  que es la que se quiere, con este efecto, para este módulo en particular, el rendimiento más alto está en los 13 voltios, potencia 53,3 Watts, es influyente el hecho de tener una temperatura ambiental de  $26^\circ\text{C}$  por proporcionar mejor desalojo de calor, requiriendo de menor potencia de entrada en el módulo para bajar de temperatura en el lado frío  $T_c$ .

Efecto Thomson:

Se presenta que el rendimiento es creciente con la potencia y el lado frío  $T_c$ , ahora está a una temperatura más alta que  $T_h$ , notándose que el lado caliente y el lado frío han cambiado de posición desarrollando mayor temperatura con menos potencia en el efecto Thomson en muy poco tiempo. Se nota que se puede hacer evaporar agua con baja potencia apenas 25,3 Watts  $T_h$  permanece constante dado a que es refrigerado permanentemente por el refrigerador.

Efecto Seebeck

La influencia del incremento en el  $\Delta T$ , es primordial para  $V_s$  aumente, es decir aquel circuito está abierto genera menos potencia, donde no hay que vencer ninguna resistencia, mostrando una tendencia lineal de  $V_s$  con  $\Delta T$ , diferente a la que se nota en el efecto generador.

Efecto generador:

Se nota en el gráfico que hay una excesiva alza de potencia al momento que  $\Delta T$  aumenta a pesar de tener una carga como lo es el bombillo es decir que puede funcionar fácilmente como batería como los son los paneles solares. Teniendo en cuenta que  $\Delta T < 60^\circ\text{C}$  el



bombillo.

Efecto Refrigerador:

Prestando atención al gráfico se nota que el Cop disminuye a medida que aumenta la potencia de entrada al módulo, en máquinas por compresión de vapor, esta curva no sería así sino un poco más prolongada. Aquí se demuestra que el rendimiento de este tipo de dispositivos decaen rápidamente a medida que le adicionamos carga, por lo tanto para capacidades mayores se necesitarán más módulos en paralelo con un área grande del intercambiador de calor, encareciéndose el costo inicial de una instalación de este tipo, pero en pequeñas capacidades resultan muy efectivas.

## CONCLUSIONES

El desarrollo de este proyecto da como resultado tres circuitos, que se instalaron con el fin de aprovechar al máximo las características y capacidades del módulo termoeléctrico y así poder realizar las experiencias de Seebeck, Peltier y Thomson; además de experiencias combinadas como el efecto generador y el refrigerador.

Esta bomba es una herramienta eficaz que asiste a el estudiante en el conocimiento de esta alternativa que es la termoelectricidad, en muchos campos de la calefacción, refrigeración y transformación de la energía y cómo influyen sus variables de voltaje, corriente y diferencia de temperatura en los lados fríos y caliente del módulo termoeléctrico.

Esto debe ser la fase inicial de un estudio de las aplicaciones de una manera más profunda con el fin de explotar a un máximo estas aplicaciones, lo cual será de gran utilidad para la universidad en el estudio de ciencias alternativas para producir y aprovechar la energía.

Su diseño en su mayoría consta de circuitos eléctricos permitiendo gran versatilidad hacia lo que desea la universidad, con los equipos que actualmente posee en sus laboratorio, que es, la utilización de interfases para obtención de información y utilizarla en un computador con su respectivo software.

La termoelectricidad como aplicación es muy efectiva en espacios reducidos, en el caso de la refrigeración y calefacción, en lugares donde el sistema de compresión de vapor no es efectivo; posiciones y gravedades diferentes de operación en donde trabajan los compresores.

En un principio existieron dificultades en la idealización de este proyecto, por su bibliografía y el poco conocimiento de esta ciencia por parte de la comunidad ingenieril, por lo tanto sus autores trataron de compilar al máximo la información existente y aplicarla en este proyecto, que requirió de muchas horas hombre de los autores y sus colaboradores como instrumentistas y electricistas.

La Tecnología de la termoelectricidad para aplicarla a gran escala resulta costosa, dada a su poca efectividad al tener grandes gastos de energía, cuando hay cargas térmicas que vencer. Por esta razón los mejores desarrollos en esta tecnología están en manos de organismos de las grandes potencias en las áreas de defensa y aeroespacial. donde ellos requieren mejores desempeños que los que confieren la termoelectricidad comercial.

## **BIBLIOGRAFIA**

ASKELAND R, Donald. La Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Grupo Editorial Iberoamérica, México 1987.

Enciclopedia de Ciencias y Tecnología, Mac Graw Hill Tomo 13, Filipinas 1977.

FAIRES, Virgil. Termodinámica. Moning Utelsa 1973.

FINK, Donald y CHISTRANSEN, Donals. Manual de Ingeniería Electrónica. Mac Graw Hill Volumen II 1993, México.

Fundamentals Handbook, Código ASHRAE 1977 Capítulo I.

Guide and Data Book, Código ASHRAE 1972, CAPÍTULO 44.

Revista Electrónica, julio 31 1980.

Normas Icontec.

## CONTENIDO

1 CONCEPTOS DE CALOR Y TEMPERATURA

2 CONCEPTOS DE SEMICONDUCTORES Y BOMBAS DE CALOR

TEORIA DE SEMICONDUCTORES

2.1.1 Efecto de la irradiación de alta energía

2.1.2 Efecto Hall

2.1.3 Efectos fotoconductores

2.1.4 Efectos Termoeléctricos

2.1.5 Efectos Acusticoeléctricos

UNION p-n

2.2.1 Rectificadores o Diodos

2.2.2 Transistor

2.2.3 Varistores

2.2.4 Termistores

2.2.4.1 Antimoniuro de Indio (InSb)

2.2.4.2 Arseniuro de Indio (InAs)

2.2.4.3 Fosfuro de Indio (InP)

2.2.4.4 Seleniuro de Plomo (PbSe)

2.2.4.5 Telururo de Bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ )

2.2.4.6 Telururo de Plomo (PbTe)

2.2.4.7 Arseniuro de Galio (GaAs)

- 2.2.4.8 Sulfuro de Cadmio (Cds)
- 2.2.4.9 Teluro de Manganeso (MnTe)
- 2.2.4.10 Sulfuro de Cesio (CeS)
- 2.2.4.11 Teluro de Plata y Antimonio (AgSbTe)
- 2.2.4.12 Antimoniuro de Cromo y Manganeso (CrMnSb)

## TEORIA DE BOMBAS DE CALOR

### 3 EFECTOS TERMOELECTRICOS

#### TERMOELECTRICIDAD

##### 3.1.1 Efecto Seebeck

##### 3.1.2 Efectos Peltier

##### 3.1.3 Efecto Thomson

### 4 DESEMPEÑO DE LAS CUPLAS TERMOELECTRICAS

#### MODULOS TERMOELECTRICOS EN SERIE

#### MODULOS TERMOELECTRICO EN PARALELO

#### COMPARACION DEL SISTEMA TERMOELECTRICO Y SISTEMA DE COMPRESION DE VAPOR PARA REFRIGERACION

### 5 CALCULO DE MODULOS TERMOELECTRICOS

#### CALCULO POR $Q_c$ MAXIMO

#### CALCULO POR COP MAXIMO

#### CALCULOS PRACTICOS

#### SELECCION DEL MODULO TERMOELECTRICO PARA LA BOMBA DE CALOR

### 6 DISEÑO DEL RADIADOR

#### INSTALACION DE MODULOS TERMOELECTRICOS EN RADIADORES

##### 6.1.1 Método de Apriete

##### 6.1.2 Método de unión epóxica

##### 6.1.3 Método de soldadura

7 DISEÑO Y DESARROLLO DE LA BOMBA DE CALOR  
TERMOELECTRICA

ESTRUCTURA GENERAL DE LA BOMBA TERMOELECTRICA

CONSIDERACIONES DEL DISEÑO

POTENCIA DE SUMINISTRO Y CONTROL DE TEMPERATURA PARA  
DISPOSITIVOS TERMOELECTRICOS

8 DISEÑO DE LA INSTRUMENTACION

CALCULO DE RESISTENCIAS SHUNT PARA EL BANCO DE PRUEBAS

9 GUIA DE LABORATORIO

COMPONENTES DE BOMBA DE CALOR TERMOELECTRICA

OPERACION

9.2.1 Procedimientos

CAPACIDAD DE EXPERIMENTO

9.3.1 Notas Generales

ANALISIS DE LOS DATOS

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

## **Introduccion a la Temoelectricidad**

En 1821 Seebeck observó que si en un circuito cerrado hecho de dos materiales metálicos diferentes, una corriente eléctrica fluye en el circuito cuando entre las dos juntas existe una diferencia de temperatura. Seebeck probó un amplio rango de elementos y compuestos, publicando sus resultados en orden de magnitud del efecto. En 1834 Peltier experimentó el efecto contrario diciendo que si una corriente eléctrica fluye a través de la junta entre dos materiales diferentes, el calor puede ser absorbido o rechazado. Peltier no relacionó sus descubrimientos con el de Seebeck. Lenz acabó con todas las conjeturas anteriores, enfriando una pequeña cantidad de agua puesta en la proximidad de una junta compuesta de varillas de bismuto y antimonio cuando una corriente directa pasa por dicha junta; estos fueron dos de los materiales que Seebeck utilizó. Un tercer efecto fue llevado a cabo por Thomson (Lord Kelvin) en 1851 y dice que el calor absorbido o rechazado en un simple conductor a un gradiente de temperatura a lo largo de este produce una corriente. Este es un efecto que toma lugar como consecuencia al calor generado por efecto Joule ( $I^2R$ ). De hecho en materiales para enfriamiento termoeléctrico, el efecto Thomson es un efecto de segundo orden comparado con los efectos Seebeck y Peltier.

Por muchos años las aplicaciones prácticas de estos efectos termoeléctricos fueron exclusivamente restringidos a termocuplas, por que los metales exhiben efecto Seebeck a baja escala. Luego de estudiar varios tipos de materiales, se concluye que los semiconductores muestran el efecto Seebeck mejor que los metales puros y aleaciones. Ahora se sigue con los efectos termoeléctricos y sus relaciones más importantes que



con este equipo se realizaran .

A. Efecto Seebeck: Si existe una diferencia de temperatura entre dos materiales A y B, el voltaje desarrollado es proporcional a la diferencia de temperatura y es dada por la siguiente ecuación:

$$\Delta E = \alpha_{ab} \Delta T$$

$\Delta E$  = Voltaje desarrollado en el circuito abierto en Voltios.

$\alpha_{ab}$  = Coeficiente de Seebeck relativo (diferencia absoluta entre los coeficientes Seebeck a y b).

$\Delta T$  = Diferencia de temperatura entre las juntas de los materiales a y b.

Ver figura 1.

B. Efectos Peltier. Se considera el mismo circuito anterior pero se induce una corriente I por intermedio de una batería y en la junta entre los dos materiales disímiles, el calor absorbido o rechazado en la unidad de tiempo es proporcional a la corriente que fluye y es dado por la siguiente ecuación:

$$Q = \pi_{ab} I$$

Q = Calor absorbido o rechazado en la unidad de tiempo en Watts.

$\pi_{ab}$  = Coeficiente relativo de Peltier en materiales a y b

I = Corriente directa que fluye en Amperios.

Ver figura 2.

Lord Kelvin luego de un análisis termodinámico de cada circuito termoeléctrico concluyó :

$$\pi = \alpha T$$

T = Temperatura absoluta en °K.

Investigaciones en la física del estado sólido han demostrado que la refrigeración termoeléctrica es manifestación del bombeo de calor, que utiliza el cambio en los niveles de energía de los electrones para transportar energía térmica. Los electrones fluyen a través de una junta de dos materiales disímiles debido a que estos con diferentes niveles disponibles de energía, deben experimentar un cambio de energía que resulta en producción o absorción de calor, la dirección de la corriente determina que podrá ocurrir, si se enfría o si se calienta.

C. Efecto Thomson. Conocido también como efecto Lenz y es el caso contrario al efecto Peltier donde se invierte el sentido de la corriente, para calentamiento, trabajando propiamente como bomba de calor.

Ver figura 3.

Se observa a través de este proyecto, las variadas aplicaciones de los dispositivos termoelectricos y es esencial que los estudiantes estén enterados del uso de esta tecnología alternativa y sus capacidades.

## **I. COMPONENTES DE LA BOMBA DE CALOR TERMOELECTRICA**

Panel:

Hecho en lámina galvanizada calibre 18, pintada de color verde donde se encuentran los interruptores conmutadores, voltímetros, amperímetros, reostatos y luces indicadoras.

Ensamble Módulo Termoelectrico:

El módulo se encuentra entre dos bloques de aluminio; para el lado frío pesa 30 gr y el lado caliente 55 gr para favorecer la absorción de calor, con dos orificios para los termómetros. El lado caliente está sujeto a un radiador el cual es refrigerado por un ventilador y además hay una resistencia calentadora para el lado frío. En su parte externa la carcasa esta fabricada en acero inoxidable forrada internamente con baquelita para disminuir el calor hacia afuera producido por la resistencia calentadora, las caras en contacto con el módulo se untan de grasa de silicona, para mejorar la transferencia de calor desde las caras .

Interruptores de Control

1 Interruptor de líneas iluminado 120 V

5 Interruptores multipolares, que trabajan a bajo voltaje con unos led indicadores del efecto que está trabajando para familiarizar más al estudiante.

Reostatos

2 Reostatos de plumillas de plata.

## Bombillo de Carga

Utilizado para ilustrar el uso de módulos termoelectricos como generador de potencia.

## Instrumentación

### Temperatura:

2 Termómetros de mercurio

1 Rango de -10 a 110°C

1 Rango de -20 a 100°C

### Voltímetros

#### Rango

1 de 15 voltios DC (Calentador)

1 de 1.5 voltios DC (generador)

1 de 25 voltios DC (módulo Peltier) ó (2,5 Volt DC Seebeck)

1 de 300 voltios AC (Línea)

### Amperímetros

#### Rango

2 de 0 ---> 5 Amperios

1 de 0 ---> 250 mA

### Protección

Fusible por sobre carga en A.C.

## II. OPERACION

- Procedimientos.

- Encienda el interruptor principal para activar transformador y ventilador.

- Asegúrese que los termómetros estén instalados en sus habitáculos, y correspondan a los rangos de los lados fríos y caliente; el de  $-20$  a  $100^{\circ}\text{C}$  en el lado frío y el de  $-10$  a  $110^{\circ}\text{C}$  en el lado caliente.

- Asegúrese de que los reostatos estén girados totalmente a la derecha (mínima potencia de entrada) antes de empezar algún experimento.

- Observe que en el panel los interruptores numerados, para posicionar debidamente cada uno, según el experimento requerido.

- Gire los reostatos para incrementar el suministro de potencias al módulo y/o al calentador según el procedimiento. Las temperaturas necesitan de tiempo hasta que se estabilicen después de cada incremento en potencia y es recomendable hacer incrementos regulares en todo el rango de los reostatos.

- No exceda en el módulo la temperatura de  $120^{\circ}\text{C}$  ya que podría ablandar las soldaduras de las cuplas, y además tener constante observación de este parámetro en todas las experiencias.

- Al final de cada experiencia gire los reostatos completamente en sentido horario para

reducir la potencia a un mínimo. Si va hacer otra experiencia cerciorese que el módulo se enfríe hasta la temperatura del cuarto o ambiente para evitar choques termicos.

Nota: El módulo es enfriado por aire, resulta que los experimentos dependen de la temperatura ambiente  $T_a$ .

### **III. CAPACIDAD DE EXPERIMENTOS**

- Investigar los efectos en la temperatura de la superficie de una u otra cara del módulo con incremento de potencia (efecto Peltier).

- Investigación de los efectos sobre la dirección de la transferencia de calor revirtiendo la polaridad del suministro de potencia a el módulo (efecto Thomson o Lenz).

- Investigación de la variación en la diferencia de temperatura en las caras del modulo cuando esta en circuito abierto (efecto Seebeck).

- Investigación del desempeño de la potencia generada con carga estable e incremento de la diferencia de temperatura.

- Estimación del coeficiente del desempeño del módulo cuando actúa como refrigerador.

- Notas Generales.

Antes de usar la bomba asegúrese de:

- Estudiar la unidad e identificar todos los interruptores y controles.
- Entender la función de los controles e interruptores.
- Tener precauciones con los límites de temperatura.
- Tiempo requerido para cambiar la temperatura de un objeto :

$$T = m C_p \Delta T / Q$$

T = Intervalo de tiempo en horas

C<sub>p</sub> = Calor específico del material en Btu/lb - °F

m = Masa del material en lbs

ΔT = Diferencia de temperatura en °F

Q = Calor agregado o removido en Btu/hr

A continuación se tienen las guías de los efectos a realizar en el equipo.

1. Investigar los efectos en la temperatura de la superficie de una u otra cara del módulo con incremento de potencia (efecto Peltier).

Procedimiento:

- Asegúrese que el interruptor principal está apagado.

- Gire los reostatos completamente en sentido horario.

- Coloque el interruptor:

1 a Normal

2 a Peltier

3 a Normal

4 a Apagado

5 a Normal

- Coloque el interruptor principal en encendido

- Incremente la potencia de entrada a el módulo termoeléctrico en incrementos regulares y aumentar luego de estabilizarse las temperaturas del lado frio y caliente.

- Anotar en la Tabla  $V_m$ ,  $I_m$   $T_h$  y  $T_c$  cuando se estabilicen las temperaturas.

- Observe y analice, los resultados y grafique.

2. Investigación de los efectos sobre la dirección de la transferencia de calor revirtiendo la polaridad del suministro de potencia al módulo (efecto Thomson o Lenz).



## Procedimiento

- Asegúrese que el interruptor principal está apagado.
  
  - Gire los reostatos completamente en sentido horario.
  
  - Coloque el interruptor
    - 1 a Normal
    - 2 a Lenz
    - 3 a Normal
    - 4 a Apagado
    - 5 a Normal  - Coloque el interruptor principal en encendido
  
  - Incremente la potencia de entrada a el módulo termoelectrico en incrementos regulares y aumentar luego de estabilizarse las temperaturas del lado frio y caliente.
  
  - Anotar en la Tabla  $V_m$ ,  $I_m$   $T_h$  y  $T_c$  cuando se estabilicen las temperaturas.
  
  - Observe y analice, los resultados y grafique.
3. Investigación de la variación en circuito abierto a través del módulo debido a la variación de la diferencia de temperatura en caras (efecto Seebeck).

Procedimiento:

- Asegúrese que el interruptor principal está apagado.

- Gire los reostatos completamente en sentido horario.

- Coloque el interruptor:

1 a Seebeck

2 a Peltier

3 a Normal

4 a Encendido.

5 a Medida Seebeck/10

- Coloque el interruptor principal en encendido.

- Incremente la potencia de entrada a el módulo termoelectrico en incrementos regulares y aumentar luego de estabilizarse las temperaturas del lado frio y caliente.

- Anotar en la Tabla  $T_h$ ,  $T_c$  y  $V_m$  cuando las temperaturas se estabilicen.

- Observe y analice, los resultados y grafique.

4. Investigación del desempeño de la potencia generada con carga estable e incremento de la diferencia de temperatura ( Efecto Generador)./

Procedimiento:

- Asegúrese que el interruptor principal está apagado.

- Gire los reostatos completamente en sentido horario.

Coloque el interruptor:

1 a Normal

2 a Peltier

3 a Generador

4 a Encendido

5 a Normal

- Coloque el interruptor principal en encendido.

- Incremente la potencia de entrada al calentador en incrementos regulares y aumentar luego de estabilizarse las temperaturas del lado frio y caliente.

- Anotar en la tabla  $V_m$ ,  $I_L$ ,  $T_h$  y  $T_c$  cuando se estabilicen las temperaturas.

- Observe y analice los resultados y grafique.

5. Estimación del coeficiente de desempeño del módulo cuando actúa como refrigerador.

Procedimiento:

- Asegúrese que el interruptor principal está apagado.

- Gire los reostatos completamente en sentido horario.

- Coloque el interruptor

1 a Normal

2 a Peltier

3 a Normal

4 a Encendido

5 a Normal

- Incremente la potencia de entrada en el calentador y módulo simultáneamente e incrementos tal que el lado frío esté manteniendo las condiciones ambientales. Aquí se asume que todo el calor es absorbido por el módulo en este caso y no hay pérdida al exterior.

- Anote en la tabla  $T_h$ ,  $T_c$ ,  $I_m$ ,  $V_m$ ,  $I_L$ ,  $V_L$  cuando se estabilicen las temperaturas.

- Observe y analice, los resultados y grafique.

A continuación se observa la Tabla para la recolección de datos y las experiencias típicas que se pueden realizar con este equipo y las gráficas de cada una de ellas.

#### **IV. ANALISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS CON LA BOMBA DE CALOR TERMOELECTRICA**

Efectos Peltier:

A Mayor diferencia de temperatura  $\Delta T$ , se obtiene menor temperatura  $T_c$  que es la que se quiere, con este efecto, para este módulo en particular, el rendimiento más alto está en los 13 voltios, potencia 53,3 Watts, es influyente el hecho de tener una temperatura ambiental de  $26^\circ\text{C}$  por proporcionar mejor desalojo de calor, requiriendo de menor potencia de entrada en el módulo para bajar de temperatura en el lado frío  $T_c$ .

Efecto Thomson:

Se presenta que el rendimiento es creciente con la potencia y el lado frío  $T_c$ , ahora está a una temperatura más alta que  $T_h$ , notándose que el lado caliente y el lado frío han cambiado de posición desarrollando mayor temperatura con menos potencia en el efecto Thomson en muy poco tiempo. Se nota que se puede hacer evaporar agua con baja potencia apenas 25,3 Watts  $T_h$  permanece constante dado a que es refrigerado permanentemente por el refrigerador.

Efecto Seebeck

La influencia del incremento en el  $\Delta T$ , es primordial para que  $V_s$  aumente, es decir aquel circuito está abierto genera menos potencia, donde no hay que vencer ninguna resistencia, mostrando una tendencia lineal de  $V_s$  con  $\Delta T$ , diferente a la que se nota en el efecto generador.

Efecto generador:

Se nota en el gráfico que hay una excesiva alza de potencia al momento que  $\Delta T$  aumenta a pesar de tener una carga como lo es el bombillo es decir que puede funcionar fácilmente como batería como lo hacen los paneles solares.

Efecto Refrigerador:

Prestando atención al gráfico se nota que el COP disminuye a medida que aumenta la potencia de entrada al módulo, en máquinas por compresión de vapor, esta curva no sería así sino un poco más prolongada. Aquí se demuestra que el rendimiento de este tipo de dispositivos decaen rápidamente a medida que le adicionamos carga, por lo tanto para capacidades mayores se necesitarán más módulos en paralelo con un área grande del intercambiador de calor, encareciéndose el costo inicial de una instalación de este tipo, pero en pequeñas capacidades resultan muy efectivas.

## CONCLUSIONES

El desarrollo de este proyecto da como resultado tres circuitos, que se instalaron con el fin de aprovechar al máximo las características y capacidades del módulo termoeléctrico y así poder realizar las experiencias de Seebeck, Peltier y Thomson; además de experiencias combinadas como el efecto generador y el refrigerador.

Esta bomba es una herramienta eficaz que asiste a el estudiante en el conocimiento de esta alternativa que es la termoelectricidad, en muchos campos de la calefacción, refrigeración y transformación de la energía y cómo influyen sus variables de voltaje, corriente y diferencia de temperatura en los lados fríos y caliente del módulo termoeléctrico.

Esto debe ser la fase inicial de un estudio de las aplicaciones de una manera más profunda con el fin de explotar a un máximo estas aplicaciones, lo cual será de gran utilidad para la universidad en el estudio de ciencias alternativas para producir y aprovechar la energía.

Su diseño en su mayoría consta de circuitos eléctricos permitiendo gran versatilidad hacia lo que desea la universidad, con los equipos que actualmente posee en sus laboratorio, que es, la utilización de interfases para obtención de información y utilizarla en un computador con su respectivo software.



La termoelectricidad como aplicación es muy efectiva en espacios reducidos, en el caso de la refrigeración y calefacción, en lugares donde el sistema de compresión de vapor no es efectivo; posiciones y gravedades diferentes de operación en donde trabajan los compresores.

En un principio existieron dificultades en la idealización de este proyecto, por su bibliografía y el poco conocimiento de esta ciencia por parte de la comunidad ingenieril, por lo tanto sus autores trataron de compilar al máximo la información existe y aplicarla en este proyecto, que requirió de muchas horas hombre de los autores y sus colaboradores como instrumentistas y electricistas.

La Tecnología de la termoelectricidad para aplicarla a gran escala resulta costosa, dada a su poca efectividad al tener grandes gastos de energía, cuando hay cargas térmicas que vencer. Por esta razón los mejores desarrollos en esta tecnología están en manos de organismos de las grandes potencias en las áreas de defensa y aeroespacial. donde ellos requieren mejores desempeños que los que confieren la termoelectricidad comercial.

