

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

Células termoelectricas y su impacto en beneficio del organismo humano y del medio ambiente

CÉLULAS TERMOELECTRICAS Y SU IMPACTO EN BENEFICIO DEL ORGANISMO HUMANO Y DEL MEDIO AMBIENTE

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA POR

ENRIQUE SARVELLO ORTIZ CHIAL  
 ASESORADO POR ING. ENRIQUE EDMUNDO RUIZ CARBALLO  
 AL CONSEGUIRSE EL TÍTULO DE  
 INGENIERO EN ELECTRONICA

Enrique Sarvello Ortiz Chial  
 Asesorado por:  
 Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo

Guatemala, octubre de 2004.

EXAMINADOR Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo  
 SECRETARIA Inga. Gilda Marina Castellanos De Illescas

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES ..... III  
 LISTA DE SÍMBOLOS ..... VI  
 GLOSARIO ..... VIII  
 RESUMEN ..... XV  
 OBJETIVOS ..... XVII  
 INTRODUCCIÓN ..... XVIII

1. LA BOMBA DE CALOR ..... 1
  - 1.1 Introducción a la bomba de calor ..... 1
  - 1.2 Clasificación ..... 4
  - 1.3 Funcionamiento ..... 6
  - 1.4 Focos ..... 7
  - 1.5 Elementos componentes ..... 7
  - 1.6 Refrigerantes ..... 9
  - 1.7 Coeficiente de prestación..... 10
2. TEMPERATURA ..... 15
  - 2.1 Medición de la temperatura ..... 15
  - 2.2 Termómetros de resistencia ..... 18
  - 2.3 Termopares ..... 20
3. SEMICONDUCTORES ..... 28
  - 3.1 Introducción a los semiconductores ..... 28
  - 3.2 Niveles de energía ..... 34
  - 3.3 Materiales extrínsecos tipo n y tipo p ..... 35
  - 3.4 Teluro de Bismuto ..... 43

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco al Todopoderoso la oportunidad de vida para poder culminar con éxito mi carrera universitaria.

De igual manera agradezco a mi madre, mi padre, mis hermanos, hermanas y demás familia por estar conmigo en todo momento. Un agradecimiento y reconocimiento muy especial a mi hermano mayor, Carlos, y su respectiva familia, por el apoyo que me han brindado desde siempre.

Así mismo, a mi asesor para este trabajo, catedráticos y amigos porque gracias a todos ellos he logrado alcanzar mi meta universitaria.



Universidad de San Carlos de Guatemala  
 Facultad de Ingeniería  
 Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
 FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO Ing. Sydney Alexander Samuels Milson  
 VOCAL I Ing. Murphy Olympe Paiz Recinos  
 VOCAL II Lic. Amalán Sánchez Álvarez  
 VOCAL III Ing. Julio David Gutiérrez Celada  
 VOCAL IV Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz  
 VOCAL V Br. Elio Hernández Velasco  
 SECRETARIO Ing. Pedro Antonio Aguilar Ponce

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO Ing. Herbert René Miranda Barrios  
 EXAMINADOR Ing. Manuel Fernando Barera P.  
 EXAMINADOR Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez

4. TERMOELECTRICIDAD .....	45
4.1 Unidades eléctricas .....	45
4.2 Teoría básica resistencia, capacidad e inductancia .....	46
4.3 Efectos de la variación de temperatura en los dispositivos termoelectrónicos.....	47
4.4 Fundamentos de la teoría electromagnética .....	48
4.5 Balance térmico en una placa termoelectrónica .....	52
4.6 Análisis de los transitorios en la operatividad de módulos termoelectrónicos .....	62
5. ARQUITECTURA DE LA CÉLULA TERMOELECTRICA .....	66
5.1 Modelado de una célula Peltier .....	66
5.2 El comportamiento de las células Peltier .....	66
5.3 Ecuaciones de la célula Peltier .....	67
5.4 Modelado de el comportamiento dinámico .....	69
5.5 Modelo simplificado .....	71
6. DISPACIÓN DE CALOR EN LOS DISPOSITIVOS TERMOELECTRICOS .....	73
6.1 Introducción a la disipación de calor .....	73
6.1 Los radiadores .....	80
7. CÉLULAS TERMOELECTRICAS Y SU IMPACTO EN EL ORGANISMO HUMANO Y EL MEDIO AMBIENTE .....	94
7.1 Beneficios de las células termoelectrónicas en comparación con los CFC y los HCFC .....	94
7.2 Los sistemas termoelectrónicos generan beneficios económicos .....	95
7.3 Termostapia .....	100
7.4 Células termoelectrónicas y su proyección hacia el futuro .....	104
7.4 Células termoelectrónicas en el campo de la inventiva en Guatemala .....	108
CONCLUSIONES.....	109
RECOMENDACIONES .....	111
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	113

INDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Bomba de calor de absorción .....	7
2. COP práctico de una bomba de calor .....	12
3. Símbolo del termopar .....	20
4. Ejemplificación de la primera ley de los termopares .....	21
5. Ejemplificación de la segunda ley de los termopares .....	22
6. Ejemplificación de la tercera ley de los termopares .....	22
7. Ejemplificación de la cuarta ley de los termopares .....	24
8. Curva temperatura-voltaje para los diferentes tipos de termopares .....	26
9. El efecto de "punta fría" en los termopares .....	27
10. Resistencia de una muestra .....	29
11. Estructura monocristalina del Ge y Si .....	31
12. Átomo de germanio .....	32
13. Enlace covalente del silicio .....	33
14. Impurezas de antimonio en un material tipo n .....	36
15. Efecto de las impurezas donadoras sobre la estructura de las bandas de energía .....	37
16. Impurezas de boro en un material tipo p .....	38
17. Flujo de electrones contra flujo de huecos .....	39
18. Material tipo n y material tipo p .....	40
19. Figura de mérito en función de la temperatura .....	43

20. Variaciones de la temperatura .....	48
21. Elemento termoelectrónico .....	52
22. Célula de efecto Peltier .....	53
23. Sistemas de montaje termoelectrónico.....	54
24. Estructura de una célula de efecto Peltier .....	60
25. Esquema de una unión NP .....	60
26. Placas de efecto Peltier y efecto Seebeck .....	61
27. Placa multinivel 130°C .....	62
28. Figura de mérito, curvas de rendimiento .....	65
29. Simil término-eléctrico equivalente .....	69
30. Circuito térmico equivalente .....	70
31. Circuito equivalente simplificado .....	70
32. Relación entre la corriente eléctrica y la diferencia de temperatura entre las dos caras de una célula termoelectrónica .....	71
33. Diferentes tipos de aleatas .....	74
34. Alea longitudinal características geométricas .....	77
35. Eficacia de aleatas longitudinales .....	79
36. Modelo eléctrico análogo .....	81
37. Radiadores (según la longitud de las aleatas en mm, el fabricante da los distintos valores de la resistencia térmica) .....	83
38. Sistema termoelectrónico con 4 radiadores por convección natural .....	85
39. Coeficiente de posición .....	87
40. Sistema termoelectrónico por convección forzada .....	88
41. Curva del factor de velocidad .....	90
42. Curva del factor forma .....	91
43. Fracción energética de los sistemas por compresor vs. los de refrigeración termoelectrónica .....	107

- $K$  Coeficiente de conducción en función de la densidad y del calor específico del material.
- $\rho$  Indica la resistividad de un material.
- $\dot{q}$  Representa la eficacia de una alea cuando se trabajan fórmulas de disipación de calor.

LISTA DE SÍMBOLOS

- $\alpha$  Símbolo utilizado en la fórmula para encontrar el COP práctico para una bomba de calor, se conoce (en dicha fórmula) como coeficiente de rendimiento. También se conoce como coeficiente de Seebeck cuando se habla de un circuito.
- $\frac{\partial}{\partial x}$  Símbolo utilizado para representar el diferencial de un valor o cantidad respecto de otro.
- $\int$  Este símbolo es utilizado para representar la fórmula de una integral.
- $\int dx$  Símbolo utilizado dentro de la fórmula de integración y se utiliza para indicar que se está integrado respecto de el valor de x.
- $\Phi$  Constante de flujo.
- $\nabla$  Indica el gradiente en una ecuación.
- $\Delta$  Símbolo utilizado para expresar un diferencial dentro de una ecuación.
- $\pi$  Representa el valor de " $\pi$ " o sea 3.1416....

TABLAS

I. Temperaturas y presiones de funcionamiento para bombas de calor .....	10
II. PER y COP para distintas bombas de calor .....	12
III. Puntos de calibración para las diferentes escalas de temperatura .....	17
IV. Características de los metales empleados en la construcción de RTD's .....	19
V. Análisis cuantitativo de tres metales usados como RTD's .....	20
VI. Composición de materiales utilizados en la construcción de termopares .....	23
VII. Clasificación de las aleaciones utilizadas en la construcción de termopares .....	24
VIII. Valores de la resistividad en materiales conductores, semiconductores, y aisladores.....	30
IX. Dimensiones y unidades características del sistema internacional .....	46
X. Refrigeración por compresor vs. refrigeración termoelectrónica .....	106

## GLOSARIO

**Aislantes térmicos** Los materiales de aislamiento térmico se emplean para reducir el flujo de calor entre zonas calientes y frías. Por ejemplo, el revestimiento que se coloca frecuentemente alrededor de las tuberías de vapor o de agua caliente reduce las pérdidas de calor, y el aislamiento de las paredes de una nevera o refrigerador reduce el flujo de calor hacia el aparato y permite que se mantenga frío.

### Anisotrópico

Propiedad de un material en que su resistencia, rigidez y otras propiedades físicas son diferentes de acuerdo a la orientación del material. Por ejemplo, si se fabrica un material compuesto de matriz polimera de manera que queden paralelas todas las fibras, el material será muy rígido en paralelo a las fibras, pero muy poco en perpendicular a ellas.

### Axial

Adj. Perteneciente o relativo al eje.

### Axis

En la columna vertebral de los mamíferos, la segunda vértebra cervical se conoce como axis. El axis tiene una proyección en

13

llamado enton; un átomo que gana un electrón forma un ion de carga negativo, llamado anión.

Formación de moléculas o átomos con carga eléctrica.

### Ionización

Conjunto de reacciones químicas que tienen lugar dentro de las células de los organismos vivos, las cuales transforman energía, células de los organismos vivos, las cuales transforman energía, conservan su identidad y se reproducen

### Metabolismo

Proceso neoplásico maligno o infeccioso en una localización secundaria ana a lesión primaria, de la cual procede por siembra a distancia.

### Metástasis

### Neoplasia

Cáncer (medicina). crecimiento tisular producido por la proliferación continua de células anormales con capacidad de invasión y destrucción de otros tejidos. El cáncer, que puede originarse a partir de cualquier tipo de célula en cualquier tejido corporal, no es una enfermedad única sino un conjunto de enfermedades que se clasifican en función del tejido y célula de origen. Existen varios cientos de formas distintas, siendo tres los principales subtipos: los sarcomas proceden del tejido conectivo como huesos, cartílagos, nervios, vasos sanguíneos, músculos y tejido adiposo. Los carcinomas proceden de tejidos epiteliales como la piel o los epitelios que tapizan las cavidades y órganos corporales, y de los tejidos glandulares de la mama y próstata.

la cima de su cuerpo que se ajusta como un pivote a una depresión localizada en la vértebra atlas.

**Centrífuga, fuerza** Fuerza que tiende a alejar de un centro.

**Cinética, energía** Energía que un objeto posee debido a su movimiento. La energía cinética depende de la masa y la velocidad del objeto.

**Eólica, energía** Energía producida por el viento.

**Anquilosante**

**Espondilitis**  
También conocida como espondilitis reumatoide o enfermedad de Marie-Stimpell, afección inflamatoria progresiva de la columna vertebral de origen desconocido, que causa rigidez en la espalda y a veces en las principales articulaciones de los miembros. Es casi exclusiva de los varones, y suele aparecer en personas jóvenes, entre los 16 y los 25 años. Se inicia en las articulaciones sacroilíacas, en la base de la columna, y suele progresar hacia arriba, afectando en ocasiones también a las caderas, los hombros o el cuello. En muchos casos, la deformidad de la espalda se mantiene una vez que la enfermedad ha dejado de progresar.

**Estatoférrica**

Capa superior de la atmósfera que empieza a una altitud entre los 12,9 y 19,3 Km. y que se extiende 50 Km. hacia arriba. En su parte inferior, la temperatura permanece casi invariable con la altitud, pero a medida que se asciende aumenta muy deprisa

14

**Oresis** Dispositivo ortopédico que sirve para sostener, alinear o corregir deformidades y para mejorar la función del aparato locomotor.

**Ozono**

De la atmósfera que protege la superficie del planeta del exceso de radiación ultravioleta.

**Rodio**

Del griego *rhodon*, "rosa", de símbolo Rh, es un elemento metálico brillante de color blanco-plateado utilizado principalmente en aleaciones. El rodio es uno de los elementos de transición del sistema periódico. Su número atómico es 45.

**Termodinámica**

Campo de la física que describe y relaciona las propiedades físicas de la materia de los sistemas macroscópicos, así como sus intercambios energéticos. Los principios de la termodinámica tienen una importancia fundamental para todas las ramas de la ciencia y la ingeniería.

**Transductor**

Dispositivo al que se aplica una energía de entrada y devuelve una energía de salida; esta energía de salida suele ser diferente al tipo de energía de entrada.

porque el ozono absorbe la luz solar. La estratosfera carece casi por completo de nubes u otras formaciones meteorológicas.

**Fonón**

En física del estado sólido, unidad cuántica de energía vibracional, análoga a la unidad cuántica de energía luminosa llamada fotón. Los átomos de los sólidos vibran como resultado de lo que pueden considerarse ondas térmicas, u ondas cortas de sonido, que se desplazan por el sólido. Cada onda tiene su propia frecuencia definida como el número de vibraciones por segundo, y puede considerarse que se comporta al mismo tiempo como una onda y como una partícula. Así, la energía de cada onda se agrupa en determinadas cantidades discretas, o cuantos (véase Teoría cuántica), llamados fonones. La energía de cada fonón viene dada por *hν*, donde *h* es la constante de Planck.

**Fotodisociación**

Reacción fotoquímica en la que una molécula, tras absorber un cuanto de luz, principalmente visible y ultravioleta se disocia.

**Gradiente**

Razón entre la variación del valor de una magnitud en dos puntos próximos y la distancia que los separa. Gradiente de temperatura, de presión.

**Ion:**

Partícula que se forma cuando un átomo neutro o un grupo de átomos ganan o pierden uno o más electrones. Un átomoque pierde un electrón forma un ion de carga positiva,

15

## RESUMEN

Las células termoelectrificadas, actualmente, son bien aceptadas en diferentes industrias a nivel mundial y constantemente se está ampliando su campo, ejemplo de lo anterior es su uso en edificios, oficinas, supermercados y hasta domicilios particulares para mantener una temperatura ambiente, inclusive este tipo de aire acondicionado es recomendable para pacientes con problemas asmáticos, pues elimina la humedad que pueda haber en dicho ambiente.

Hay en la actualidad, también, pequeños recipientes, que se pueden conectar al encendedor de cigarrillos de los automóviles, que pueden conservar fríos los alimentos o medicinas, no es aconsejable llamarlos frigoríficos, pues al invertir la polaridad interna de una célula Peltier, en lugar de enfriar los alimentos los puede calentar, incluso en la aplicación de termoterapia se aplican dichos componentes, en las computadoras es utilizado por algunos fabricantes para enfriar los componentes internos de dichos aparatos, como se habrá sospechado ya dichos componentes enfrían sin necesidad de algún tipo de refrigerante por lo que su utilización es de gran higiene para el medio ambiente y también para el organismo de quien lo utiliza o manipula, pues no hay temor a un derrame, como ocurría antes con la utilización de refrigerantes arriba mencionados.

El aporte de la presente investigación será despertar el espíritu de experimentación y dar una pequeña herramienta para las aplicaciones que al cerebro humano puedan ocurrírsele, por ejemplo, en Guatemala se exporta gran cantidad de productos marítimos, se puede construir o bien utilizar cámaras frigoríficas (aquí si es bien empleada dicha

16

17

18

palabra) en base a células Peltier, para el transporte de dichos productos, o bien para el traslado de frutas, legumbres, verduras, etc.

En el campo de la invención hay también infinidad de posibilidades, por ejemplo, crear ropa climatizada, es decir, una chaqueta que se mantenga a cierta temperatura, haciéndola funcionar con pilas eléctricas, o talvez crear calzado para condiciones de extrema temperatura, etc.

19

Hay un espacio, en el presente trabajo, para el estudio de dispositivos empleados en la disipación de calor, es tan importante el disipador de calor como la célula termoelectrónica misma.

Es importante resaltar que debido a lo cómodo que es manipular una célula termoelectrónica, abre posibilidades insospechadas a la inventiva e ingenio en cualquier lugar y para cualquier persona.

22

## OBJETIVOS

- **General**

Describir el motivo por el cual las células termoelectrónicas son consideradas, en su uso y aplicación, como la solución más adecuada por su limpieza ambiental y la menos nociva al organismo humano.

- **Específicos**

1. Ampliar el conocimiento que se tiene sobre las células termoelectrónica para poder comprender sus aplicaciones.
2. Describir los diseños de sistemas creados a partir de células termoelectrónicas para poder adecuar y recomendar su uso y las ventajas que esto conlleva referente a otros métodos o mecanismos creados con el mismo propósito.
3. Evidenciar las razones por las cuales el uso de células termoelectrónicas no está limitado a un solo campo, sino al contrario, a nivel domiciliar, inclusive en automóviles o en algún futuro hasta en nuestra ropa podíamos encontrar alguna aplicación a los dispositivos aquí tratados.

20

## I. LA BOMBA DE CALOR

### I.1 Introducción a la bomba de calor

El calor fluye de forma natural desde las altas temperaturas a las bajas temperaturas. Sin embargo, la bomba de calor es capaz de forzar el flujo de calor en la dirección contraria, utilizando una cantidad de trabajo relativamente pequeña. Las bombas de calor pueden transferir este calor desde las fuentes naturales del entorno a baja temperatura (foco frío), tales como aire, agua o la propia tierra, hacia las dependencias interiores que se pretenden calefactar, o bien para emplearlo en procesos que precisan calor en la edificación o la industria.

Es posible, así mismo, aprovechar los calores residuales de procesos industriales como foco frío, lo que permite disponer de una fuente a temperatura conocida y constante que mejora el rendimiento del sistema.

Las bombas de calor también pueden ser utilizadas para refrigerar. En este caso la transferencia de calor se realiza en el sentido contrario, es decir desde la aplicación que requiere frío al entorno que se encuentra a temperatura superior. En algunas ocasiones, el calor extraído en el enfriamiento es utilizado para cubrir una demanda simultánea de calor.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como prioridad demostrar que el uso de dispositivos termoelectrónicos, llamados células termoelectrónicas, no produce ningún efecto adverso al medio ambiente ni al organismo humano de la persona que lo manipule o se encuentre cerca de dicho dispositivo.

También se demuestra que los dispositivos termoelectrónicos no poseen partes que al expirar su ciclo de vida, pudieran ser tóxicas al medio ambiente.

Se hace un estudio de lo que es la bomba de calor, se hace énfasis en la bomba de calor mecánica, las distintas partes que componen dicho dispositivo y los riesgos que pudieran derivar de su uso, se concluye que las células termoelectrónicas son bombas de calor.

Para una mejor asimilación de este trabajo se hace mención de la temperatura, la forma de medirla y la interconexión entre un dispositivo termoelectrónico y el concepto temperatura, esto se logra con el estudio de los termopares.

Es necesario conocer de que manera se logra la tecnología de termoelectricidad, se hace un repaso de lo que es semiconductores, esto para conocer los tipos de materiales con que se construyen los dispositivos termoelectrónicos.

21

Para transportar calor desde la fuente de calor al sumidero de calor, se requiere aportar un trabajo. Teóricamente, el calor total aportado por la bomba de calor es el extraído de la fuente de calor más el trabajo externo aportado.

El principio de funcionamiento de las bombas de calor no es reciente. Sus orígenes provienen del establecimiento por Carnot en 1824, de los conceptos de ciclo y reversibilidad, y por la concepción teórica posterior de Lord Kelvin. Un gas evolucionaba cíclicamente, era comprimido y posteriormente expandido, obteniendo frío y calor.

El desarrollo de los equipos de refrigeración tuvo un rápido progreso, en aplicaciones como la conservación de alimentos y el aire acondicionado. Sin embargo, las posibilidades de utilizar la otra fuente térmica, el calor o el frío y calor simultáneamente no se aprovecharon.

Eso fue debido por una parte a las dificultades tecnológicas que presentaba la construcción de la bomba de calor y por otra al bajo precio de la energía, que hacía que ésta no fuera competitiva con los sistemas tradicionales de calefacción basándose en carbón, fuel-oil o gas, que presentaban una clara ventaja en relación con sus costes. Por ejemplo, en 1965, en Estados Unidos, sólo las bombas de calor con un COP superior a 5 conseguían acercarse a los costes del combustible más caro, que en esos años era el gas ciudad.

A finales de los años cincuenta se inició la expansión de la bomba de calor en Estados Unidos y su producción en serie, con la siguiente evolución en el número de ventas: 1954 (2.000 unidades), 1957 (10.000 unidades), 1963 (76.000 unidades).

24

En Europa no se inicia su comercialización hasta 1970. Así, en 1973 se vendieron en Francia 600 bombas de calor de tipo doméstico y 7.000 unidades en 1977. En España en 1980, del orden de 2.500 unidades. En 1968 se realizó la primera instalación con bomba de calor a gas en Europa, en una pista polideportiva holandesa.

La crisis del petróleo y el alza de los precios de los combustibles a partir de 1973, impulsó las investigaciones en nuevos equipos de alta eficiencia, además de cambiar el posicionamiento de los costes de calefacción, situación que benefició el desarrollo de la bomba de calor.

A lo largo de estos años, además de los cambios coyunturales que han propiciado el aumento de las ventas, las bombas de calor han tenido una evolución positiva desde el punto de vista tecnológico.

En un principio, el desarrollo se centró en equipos reversibles aire-aire. El fin principal de estas bombas era la refrigeración, en consecuencia el diseño estaba orientado a las condiciones del ciclo para obtener frío en verano. Por esta razón existían una serie de defectos de la máquina al funcionar para dar calefacción, que hoy en día se encuentran superados gracias al desarrollo de los compresores y a la introducción de la electrónica para el control de desescarche.

Estos defectos eran:

- Fallos del compresor por golpes de líquido, falta de engrase o sobrecarga del motor de accionamiento.
- Formación de hielo en el evaporador.

25

- "Multi-split": están constituidas por una unidad exterior y varias unidades interiores.

Según funcionamiento:

- Reversibles: pueden funcionar tanto en ciclo de calefacción como en ciclo de refrigeración invirtiendo el sentido de flujo del fluido frigorífico gracias a una válvula de 4 vías.
- No reversibles: únicamente funcionan en ciclo de calefacción.
- Termo-frigobombas: producen simultáneamente frío y calor.

### 1.3. Funcionamiento

Bomba de calor de compresión mecánica:

La mayor parte de las bombas de calor existentes trabajan con el ciclo de compresión de un fluido condensable. Sus principales componentes son:

- Compresor
- Válvula de expansión
- Condensador
- Evaporador

Se bombea calor del exterior hacia el interior en el ciclo de calefacción.

Se bombea calor del interior hacia el exterior en el ciclo de refrigeración.

28

Según el medio de origen y destino de la energía:

La bomba de calor se denomina mediante dos palabras. La primera corresponde al medio del que absorbe el calor (foco frío) y la segunda al medio receptor (foco caliente)

- Bombas de calor aire-aire: son las más utilizadas, principalmente en climatización.
- Bombas de calor aire-agua: se utilizan para producir agua fría para refrigeración o agua caliente para calefacción y agua sanitaria.
- Bombas de calor agua-aire: permiten aprovechar la energía contenida en el agua de los ríos, mares, aguas residuales, etc. Producen unos rendimientos energéticos mejores que las que utilizan aire exterior, debido a la mayor uniformidad de la temperatura del agua a lo largo del año.
- Bombas de calor agua-agua: similares a las anteriores, excepto que los emisores son radiadores a baja temperatura, *fan-coils* o suelo radiante.
- Bombas de calor tierra-aire y tierra-agua: aprovechan el calor contenido en el terreno. Son instalaciones poco habituales, debido a su coste y a la necesidad de disponer de grandes superficies de terreno.

Según construcción:

Por la forma de construir la máquina, ésta puede ser:

- Compacta: todos los elementos que constituyen la bomba de calor se encuentran alojados dentro de una misma carcasa.
- "Split": o partidas: están constituidas por dos unidades separadas. Una exterior donde se aloja el compresor y la válvula de expansión y una unidad interior. De esta manera se evitan los ruidos en el interior local.

27

### 1.5 Elementos componentes

Para que el fluido refrigerante evolucione según los ciclos anteriormente expuestos son necesarias los elementos que a continuación se explican:

Compresor: su misión es elevar la presión del vapor refrigerante desde una presión de aspiración a una presión de descarga más alta. Se pueden clasificar en dos grandes grupos: compresores volumétricos o de desplazamiento positivo, que pueden ser alternativos o rotativos, y compresores centrífugos. En cuanto al acoplamiento motor-compresor pueden ser:

- Abiertos
- Semihérmicos
- Hérmicos

Condensador: se pueden clasificar en:

- Condensadores que ceden el calor del fluido refrigerante al aire.
- Condensadores que ceden el calor del fluido refrigerante al agua.

Evaporador: según el estado del vapor de refrigerante a la salida del evaporador estos se clasifican en:

- De expansión seca
- Inundados

Según el fluido del que extraiga el calor, los evaporadores pueden ser: axiales o centrífugos.

Evaporadores de agua pueden ser coaxiales en contracorriente o bien multibobinados.

30

En el momento actual la utilización de bombas de calor se justifica, además del ahorro energético que suponen, por su contribución a la reducción de las emisiones de CO2. Las bombas de calor consumen menos energía primaria que los medios tradicionales de calefacción. Sin embargo, a nadie se le escapa que el efecto sobre el medio ambiente de las bombas de calor depende mucho de cómo se genere la energía eléctrica.

Si la energía eléctrica proviene de fuentes como la hidroeléctrica o eólica, es clara la reducción de las emisiones, pero incluso cuando la electricidad que alimenta las bombas es generada mediante centrales térmicas de combustibles fósiles, se demuestra que la reducción total de emisiones es importante.

### 1.2. Clasificación

Las bombas de calor se pueden clasificar según diferentes criterios. A continuación se muestran algunos de los más utilizados.

Según el tipo de proceso:

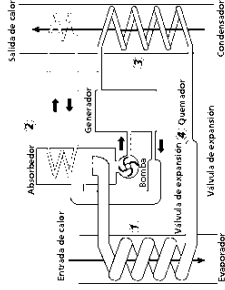
- Bombas de calor, cuyo compresor está impulsado mecánicamente por un motor eléctrico de gas, diesel, o de otro tipo.
- Bombas de calor de accionamiento térmico (bombas de calor de absorción), en las que el ciclo se impulsa mediante calor a temperaturas elevadas.
- Bombas de calor electroterómicas, que funcionan según el efecto Peltier.

26

Bomba de calor de absorción:

Las bombas de calor de absorción son accionadas térmicamente, esto quiere decir que la energía aportada al ciclo es térmica en vez de mecánica. Las parejas de fluidos más utilizadas actualmente son: agua como fluido refrigerante en combinación con bromuro

Figura 1. Bomba de calor de absorción



Tomado de la página WWW.arnakissis, por Anselmo Chivó, introducción a la termodinámica

Los ciclos de absorción son análogos a los de compresión, únicamente se sustituye el compresor por un circuito de disoluciones que realiza la misma función que éste, es decir, eleva la presión y temperatura del fluido frigorífico en estado vapor.

### 1.4 Focos

La bomba de calor extrae energía de un medio. Mediante el trabajo externo aportado, esta energía es cedida a otro. El medio del que se extrae la energía se llama foco frío y el medio al que se cede se llama foco caliente.

29

transportados a la estratosfera donde reaccionan con el ozono destruyéndolo. Por estas razones, la utilización de estos refrigerantes está restringida por ley.

El desarrollo de la tecnología frigorífica y de la bomba de calor ha estado siempre ligada a la investigación en el campo de los refrigerantes.

Actualmente, el fluido con el que funcionan la práctica totalidad de las bombas de calor en la mayoría de países es el R-22, (HCFC-22) cuya fórmula química es CHClF<sub>2</sub>. El R-22 únicamente tiene un átomo de cloro y por tanto resulta menos perjudicial para la capa de ozono que los CFC's.

No obstante, y en virtud del reglamento de la Unión Europea 3093/94, se ha establecido un programa de reducción progresiva de utilización de los HCFC's, de forma que la producción de R-22 finalizará en el año 2014.

En cuanto a las temperaturas y presiones de funcionamiento en la aplicación de una bomba de calor del R-22 estas suelen ser:

Tabla 1. Temperaturas y presiones de funcionamiento para bombas de calor

Temperatura es		Presiones (kg/cm <sup>2</sup> abs)	
Evaporador	+25°C	Evaporador	10,5
Condensador	+70°C	Condensador	30,5

### 1.7 Coeficientes de prestación

Se define el coeficiente de prestación de una bomba de calor COP (*Coefficient of performance*) como el cociente entre la energía térmica cedida por el sistema y la energía de tipo convencional absorbida.

Dispositivos de seguridad y control: los dispositivos de seguridad y control para el compresor en aquellos casos en que se esté trabajando fuera de las condiciones permitidas. Estos elementos de control son:

- Presostato de alta presión
- Presostato de baja presión
- Presostato de aceite
- Termostato de descarga

### 1.6. Refrigerantes

Los fluidos refrigerantes deben tener ciertas propiedades termodinámicas de tal manera que, para lograr su objetivo, condensen y evaporen a las temperaturas adecuadas. Un fluido puede evaporar a mayor temperatura cuando se eleva su presión, pero los compresores no pueden alcanzar cualquier presión y los evaporadores y condensadores no deben trabajar a sobrepresiones ni depresiones elevadas respectivamente.

Por otra parte, los fluidos refrigerantes no deben ser tóxicos, ni inflamables, ni reaccionar con los materiales que constituyen la máquina.

Los fluidos halogenados presentan las mejores propiedades, ya que trabajan en las temperaturas y presiones adecuadas para esta aplicación y no son tóxicos ni inflamables. No obstante, pueden contribuir a la destrucción de la capa de ozono. Si al final de su vida útil se liberan en el ambiente, la incidencia de rayos ultravioleta sobre estas sustancias hace que se fotodisocien quedando libres radicales de cloro, que acaban siendo

El COP práctico depende del coeficiente de rendimiento a y y de las temperaturas del foco frío y caliente. En la figura 2 se representa esta dependencia.

PER:

Se le denomina REP (Rendimiento de Energía Primaria) o PER (*Primary Energy Ratio*) por sus siglas en inglés.

Este coeficiente justifica la utilización de la bomba de calor frente a otras alternativas tradicionales.

Figura 2. COP Práctico de una bomba de calor

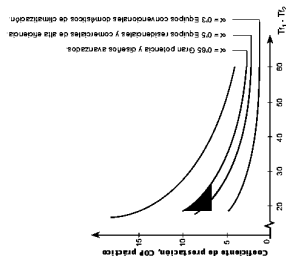


Tabla II. PER y COP para distintas bombas de calor

COP teórico:

En un ciclo ideal de Carnot:

$$COP_{teórico} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Siendo:

T1: Temperatura absoluta del foco caliente  
T2: Temperatura absoluta del foco frío  
COP práctico

$$COP_{práctico} = \alpha \frac{T_1}{T_2 - T_1} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Alpha es un coeficiente de rendimiento que tiene en cuenta que el ciclo real no se desarrolla en condiciones perfectas de isotermodinámica, (los procesos son irreversibles y no perfectamente adiabáticos). Este coeficiente oscila entre 0,3 en máquinas pequeñas, hasta 0,65 en las de gran potencia.

T2 y T1 son respectivamente las temperaturas absolutas de evaporación y condensación del fluido refrigerante.

Para que la transmisión de calor entre el fluido refrigerante y un foco frío tenga lugar, es necesario que T2 sea inferior a T2. De la misma manera, para que el fluido refrigerante ceda calor al foco caliente, T1 debe ser superior a la temperatura del foco caliente T1.

W: Resto de energías consumidas en el periodo considerado: pérdidas en el motor eléctrico, aportaciones externas de calor, etc.

Al coeficiente de prestación estacional también se le denomina SPF (*Seasonal Performance Factor*) por sus siglas en inglés. Es con este factor con el que se deben de comparar los gastos de funcionamiento de las diferentes alternativas de calefacción.

transportados a la estratosfera donde reaccionan con el ozono destruyéndolo. Por estas razones, la utilización de estos refrigerantes está restringida por ley.

El desarrollo de la tecnología frigorífica y de la bomba de calor ha estado siempre ligada a la investigación en el campo de los refrigerantes.

Actualmente, el fluido con el que funcionan la práctica totalidad de las bombas de calor en la mayoría de países es el R-22, (HCFC-22) cuya fórmula química es CHClF<sub>2</sub>. El R-22 únicamente tiene un átomo de cloro y por tanto resulta menos perjudicial para la capa de ozono que los CFC's.

No obstante, y en virtud del reglamento de la Unión Europea 3093/94, se ha establecido un programa de reducción progresiva de utilización de los HCFC's, de forma que la producción de R-22 finalizará en el año 2014.

En cuanto a las temperaturas y presiones de funcionamiento en la aplicación de una bomba de calor del R-22 estas suelen ser:

Tabla 1. Temperaturas y presiones de funcionamiento para bombas de calor

Temperatura es		Presiones (kg/cm <sup>2</sup> abs)	
Evaporador	+25°C	Evaporador	10,5
Condensador	+70°C	Condensador	30,5

### 1.7 Coeficientes de prestación

Se define el coeficiente de prestación de una bomba de calor COP (*Coefficient of performance*) como el cociente entre la energía térmica cedida por el sistema y la energía de tipo convencional absorbida.

Bombas de calor eléctricas	Bombas de calor con motor de combustión	Bombas de calor de absorción de doble efecto	Bombas de calor de absorción de simple efecto
COP 2,5-4	0,8-2	1-1,7	1,8-2,4
PER 0,8-1,4	0,8-2	1-1,7	1,8-2,4

Tomado de la página WWW.arakis.es, por Anselmo Clavé, introducción a la termodinámica

El PER se define como la relación entre la energía térmica y la energía primaria consumida en el proceso.

En la tabla II se muestran los valores habituales del COP y PER de distintas bombas de calor trabajando entre 0° y 50° C.

COP medio estacional: las condiciones del foco caliente y del frío van variando a lo largo del año, y en consecuencia las temperaturas a las que debe trabajar el fluido también deben variar. Por esta razón, es posible que haya que aportar al sistema energías adicionales a la del compresor en los momentos más desfavorables. A la hora de estudiar la viabilidad e interés de una bomba de calor en una determinada aplicación es necesario determinar el valor de este coeficiente.

$$COP_{medioestacional} = \frac{Q_1}{W + W'} \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Siendo:

Q1: Calor total cedido para la calefacción en el periodo considerado en valor absoluto.

W': Trabajo realizado por el compresor sobre el fluido en el periodo considerado en valor absoluto.

de temperatura. Para definir éstas se utilizan diferentes puntos de calibración. Para cada una de las escalas, la energía promedio por molécula se define a partir de condiciones existentes entre los estados o fases sólida, líquida y gaseosa de algunos materiales puros. Se considera un estado de equilibrio de un material puro cuando el cambio de fase sólido-líquido, líquido-sólido del material ocurre a la misma temperatura en ambas direcciones.

Los puntos de calibración más comunes son:

1. Equilibrio del oxígeno líquido-gas.
2. Equilibrio del agua sólido-líquido.
3. Equilibrio del agua líquido-gas.
4. Equilibrio del oro sólido-líquido.

Escala de temperatura absoluta

Son aquellas donde se designa como la unidad de temperatura cero a aquella donde no existe energía térmica. Las dos unidades para medición de temperatura absoluta son el Kelvin y el Rankine, y difieren entre sí sólo por la cantidad de energía representada por una unidad de medición. La relación entre ambos sistemas es:

$$T(K) = \frac{5}{9} T(R)$$

Ecuación 2.1

Escala de temperatura relativa

Son aquellas donde el cero de la escala no equivale a cero energía térmica. Existen dos unidades de este tipo denominadas escalas Celsius y Fahrenheit, respectivamente, con unidades en grados centígrados (o C) y grados Fahrenheit (o F) relacionadas con las escalas Kelvin y Rankine respectivamente a partir de las relaciones:

$$T(^{\circ}C) = T(K) - 273.15$$

Ecuación 2.2

$$T(^{\circ}F) = T(K) \cdot \frac{9}{5} + 32$$

Ecuación 2.3

$$T(^{\circ}F) = \frac{9}{5} T(^{\circ}C) + 32$$

Ecuación 2.4

La transformación de las unidades Celsius a Fahrenheit está dada por:

La tabla III muestra los valores en cada una de las escalas en los puntos de calibración mencionados anteriormente. Es posible relacionar la temperatura a energía térmica en Joules usando la constante de Boltzman que aunque no da resultados exactos para la totalidad de los casos, representa una aproximación aceptable para la declaración de que la energía de una molécula puede ser expresada en función de la temperatura en grados Kelvin por medio de la relación:

$$W_{TM} = \frac{3}{2} k T(K) = \frac{1}{2} m V_{TH}^2$$

Ecuación 2.5

Donde  $k = 1.381(D-23) \text{ J/ok}$  es la constante de Boltzman, y el último término representa la energía cinética siendo  $V_{TH}$  la velocidad térmica promedio de la molécula de un gas.

Tabla III. Puntos de calibración para las diferentes escalas de temperatura

Punto de calibración	Temperatura		
	K	°F	°C
Cero energía térmica	0	-273.15	-458.6
En oxígeno líquido/gas	90.18	182.3	-182.87
En agua hielo/líquido	273.15	491.6	0
En agua vapor/gas	373.15	671.6	100
En oro sólido/líquido	1338.15	2405	1065

**Temperatura**

Esta definida como la energía promedio por molécula de un material. Existen cuatro tipos de unidades para la medición de temperatura que primordialmente definen escalas

**2.1 Medición de temperatura**

- La temperatura es uno de los fenómenos físicos que con mayor frecuencia se mide en los procesos industriales. Ésta se mide básicamente a partir de cambios en las propiedades de diversos materiales al ser influidos por la temperatura entre los cuales podemos contar:
- a) Variaciones en el volumen o en el estado de los cuerpos (sólidos, líquidos o gases)
  - b) Variaciones en la resistencia de algún conductor (sondas de resistencias.)
  - c) Variación en la resistencia de algún semiconductor (termistores).
  - d) Fuerza electromotriz generada en la unión de dos metales distintos (termopares).
  - e) Intensidad de la radiación emitida por un cuerpo (pirómetros de radiación).
  - f) Fenómenos utilizados en el laboratorio (velocidad del sonido de un gas, frecuencia de resonancia de un cristal, etc).

$$R_T = R_0 (1 + \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^3 + \dots + \delta T^N)$$

Ecuación 2.6

**2.2 Termómetros de resistencia**

Los conductores generalmente muestran un incremento en su resistencia con la temperatura, que se rige por la siguiente expresión:

**Transductores de temperatura**

Los transductores electrónicos para medición de temperatura se clasifican en:

1. Termómetros de resistencia.
2. Termistores.
3. Termopares.
4. Termómetros de unión PN.
5. Circuitos integrados sensores de temperatura.
6. Circuitos de conversión de temperatura a frecuencia.

de temperatura. Para definir éstas se utilizan diferentes puntos de calibración. Para cada una de las escalas, la energía promedio por molécula se define a partir de condiciones existentes entre los estados o fases sólida, líquida y gaseosa de algunos materiales puros. Se considera un estado de equilibrio de un material puro cuando el cambio de fase sólido-líquido, líquido-sólido del material ocurre a la misma temperatura en ambas direcciones.

Los puntos de calibración más comunes son:

1. Equilibrio del oxígeno líquido-gas.
2. Equilibrio del agua sólido-líquido.
3. Equilibrio del agua líquido-gas.
4. Equilibrio del oro sólido-líquido.

Escala de temperatura absoluta

Son aquellas donde se designa como la unidad de temperatura cero a aquella donde no existe energía térmica. Las dos unidades para medición de temperatura absoluta son el Kelvin y el Rankine, y difieren entre sí sólo por la cantidad de energía representada por una unidad de medición. La relación entre ambos sistemas es:

$$T(K) = \frac{5}{9} T(R)$$

Ecuación 2.1

Escala de temperatura relativa

Son aquellas donde el cero de la escala no equivale a cero energía térmica. Existen dos unidades de este tipo denominadas escalas Celsius y Fahrenheit, respectivamente, con unidades en grados centígrados (o C) y grados Fahrenheit (o F) relacionadas con las escalas Kelvin y Rankine respectivamente a partir de las relaciones:

$$T(^{\circ}C) = T(K) - 273.15$$

Ecuación 2.2

$$T(^{\circ}F) = T(K) \cdot \frac{9}{5} + 32$$

Ecuación 2.3

$$T(^{\circ}F) = \frac{9}{5} T(^{\circ}C) + 32$$

Ecuación 2.4

La tabla III muestra los valores en cada una de las escalas en los puntos de calibración mencionados anteriormente. Es posible relacionar la temperatura a energía térmica en Joules usando la constante de Boltzman que aunque no da resultados exactos para la totalidad de los casos, representa una aproximación aceptable para la declaración de que la energía de una molécula puede ser expresada en función de la temperatura en grados Kelvin por medio de la relación:

$$W_{TM} = \frac{3}{2} k T(K) = \frac{1}{2} m V_{TH}^2$$

Ecuación 2.5

Donde  $k = 1.381(D-23) \text{ J/ok}$  es la constante de Boltzman, y el último término representa la energía cinética siendo  $V_{TH}$  la velocidad térmica promedio de la molécula de un gas.

Una desventaja del uso de RTDs, es que se deben emplear corrientes que circulan a través de ellos lo suficientemente pequeñas para evitar el auto calentamiento.

Un dato técnico importante es el llamado constante de disipación que indica la potencia requerida para elevar la temperatura un grado (cualquier escala).

Una constante de disipación de 25 mW / o C muestra que la pérdida de potencia en un RTD igual a 25 mW y el RTD se calentará 1 o C.

El auto calentamiento se calcula a partir de la expresión

$$\Delta T = \frac{P}{P_0}$$

Ecuación 2.7

Donde:  $\Delta T$  = diferencia de temperatura ( auto calentamiento ).  
 $P$  = potencia disipada en el RTD en "Watts".  
 $P_0$  = Constante de disipación en W / oC.

Tabla IV. Características de los metales empleados en la construcción de RTD's

MATERIAL	Características
Platino	a) Excelente estabilidad. b) Escala. c) Alto costo.
Níquel	a) Resistencia más elevada. b) Poca linealidad. c) Varían su coeficiente.
Cobre	a) Variación de resistencia anómala. b) Escala. c) Bajo costo.

Tabla V. Análisis cuantitativo de tres metales diferentes usados como RTD's

Metal	Resistencia	Cant de disipación	Rango de la	Costo	Resistencia precisión
Platino	9.83	0.0032	-200-500	Alto	25,100,150 0.01
Níquel	6.39	0.0032	-150-300	Medio	100 0.5
Cobre	1.55	0.00425	-200-120	Bajo	10 0.1

**2.3 Termopares**

Los termopares son elementos de medición de temperatura activos, esto es, que generan una señal eléctrica proporcional a la temperatura a la que están sometidos. Los

termopares se componen de dos conductores de diferente coeficiente térmico unidos en sus extremos.

El símbolo del termopar se muestra en la figura 3.

Figura 3. Símbolo del termopar



Un termopar es un dispositivo capaz de convertir la energía calórica en energía eléctrica. Su funcionamiento se basa en los descubrimientos hechos por Seebeck en 1821, cuando hizo circular corriente eléctrica en un circuito, formado por dos metales diferentes cuyas uniones se mantenían a diferentes temperaturas. Esta circulación de corriente obedecía a dos efectos termoelectrónicos combinados, el efecto Peltier, que provoca la liberación o absorción de calor en la unión de dos metales diferentes cuando una corriente circula a través de la unión, y el efecto Thomson, que consiste en la liberación o absorción de calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo en el que existe un gradiente de temperaturas.

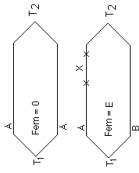
Es decir, la fuerza electromotriz es proporcional a la temperatura alcanzada por la unión térmica. El efecto depende de los metales que forman la unión.

La combinación de los dos efectos Peltier y Thomson, es la causa de la circulación de corriente al cerrar el circuito en el termopar. esa corriente puede calentar el termopar y afectar la precisión en la medida de la temperatura, por lo que durante la medición debe hacerse mínimo su valor.

La operación de un termopar se rige por cuatro leyes que se exponen continuación.

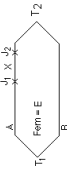
1. Ley de la temperatura externa. Una corriente eléctrica no se puede mantener en un circuito compuesto por un sólo metal homogéneo al aplicar calor en los extremos, ahora, si dos metales, A y B, son sometidos a temperaturas T1 y T2 en sus uniones, entonces existirá una fuerza electromotriz (fem) generada en los extremos.

Figura 4. Ejemplificación de la primera ley de los termopares



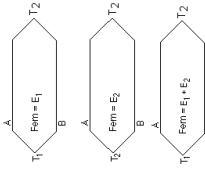
2. Ley del metal intermedio. Dos metales homogéneos A y B tienen sus uniones a temperaturas T1 y T2. Si un tercer metal X se conecta en un corte del metal A formando uniones J1 y J2 y la temperatura a la que está sometido el metal X es uniforme en toda su longitud, entonces la fem generada en el arreglo será igual a aquella sin el conductor X.

Figura 5. Ejemplificación de la segunda ley de los termopares



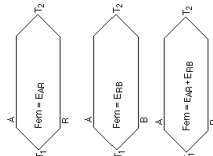
3. Ley de la temperatura intermedia. Si dos metales homogéneos A y B están sometidos a temperaturas T1 y T2 en sus uniones generada una fem E1, y se efectúa un cambio en las temperaturas T2 y T3 en sus extremos generando una fem E2, entonces si las uniones se sometieran a temperaturas T1 y T3, la fem térmica generada será igual a E1 + E2.

Figura 6. Ejemplificación de la tercera ley de los termopares



4. Ley de la fem aditiva. Si dos metales A y B son sometidos a temperaturas T1 y T2 en sus uniones, la fem generada será Earr. Al unir dos metales R y B y someterlos a temperaturas T1 y T2 en sus uniones, la fem generada será Efb. Entonces, si se utilizan los metales A y B bajo las mismas condiciones de operación, la fem generada será Efab.

Figura 7. Ejemplificación de la cuarta ley de los termopares



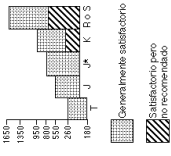
De acuerdo al rango de operación y a la combinación de aleaciones que los componen los termopares se clasifican dentro de los siguientes tipos:

Tabla VII. Clasificación de las aleaciones utilizadas en la construcción de termopares

Tipos	Minimales
J	Metales Constantes (Caleja 14)
T	Cobre-Copelanda (Caleja 20)
K	Cromo-Alumel (Caleja 14)
R	Platino-Rodan (3%)-Platino.
S	Platino-Rodan (3%)-Platino.
J'	Hierro-Copelanda (Caleja 8).

En la figura 7 se ven los rangos usuales de los distintos tipos de termopares indicando además su comportamiento. La característica más importante de los termopares para su utilización como sensores de temperatura es que son dispositivos que presentan gran linealidad (Fig. 8) dentro de su rango de operación y su costo es reducido.

Figura 7. Rango de temperaturas aplicable a los diferentes tipos de termopares



**Selectividad**

La elección de un termopar para una aplicación industrial, depende en términos generales del rango de operación al que será sometido, a la exactitud requerida y al costo del mismo. A bajas temperaturas (200-600 o C) son recomendables los tipos J, K, y T. El tipo J es el más barato, pero tiene que tomarse la precaución de no usarse en ambientes sulfatados. El tipo K aunque más caro es el más lineal. El conectorio anterior sobre ambientes sulfatados se deriva del hecho de al tratarse de la unión de dos metales, un termopar es susceptible al ataque químico de agentes oxidantes, por lo que deben estar debidamente protegidos en cubiertas llamadas termopozos usadas también para la instalación de RTD's y termistores.

A temperaturas altas se recomiendan los tipos R, y S donde el tipo R es el más recomendable debido a su sensibilidad.

Los termopares, a pesar de ser sensores lineales, no están exentos de desventajas que limitan su uso. En primer lugar, es necesario apuntar que tienen una relación señal a ruido (SNR) muy baja, es decir, son muy susceptibles a sufrir alteraciones por ruido.

Tabla VI. Composición de materiales utilizados en la construcción de termopares

Material	Composición
Hierro	99.9% de Hierro.
Constantes	40% de Hierro y 60% de Cobre.
Platino-Rodan (3%)	97% de Platino y 3% de Rodan.
Platino-Rodan (3%)	95% de Platino y 5% de Rodan.
Cobre	100% de Cobre.



En las tablas de medidas, el término resistividad ( $\rho$ , letra griega rho) se utiliza a menudo cuando se comparan los niveles de resistencia de materiales.

La resistividad de un material puede examinarse conociendo la resistencia de una muestra que tiene una extensión de 1 cm y un área de sección transversal de 1 cm<sup>2</sup>, como se muestra en la figura 10. Revuélvese que la ecuación para la resistencia de un material (a una temperatura dada) se determina mediante  $R = \rho l/A$ , donde  $R$  se mide en ohms,  $l$  es la longitud de la muestra,  $A$  es el área superficial incidente y  $\rho$  es la resistividad. Si  $l = 1$  cm y  $A = 1$  cm<sup>2</sup>, entonces  $R = \rho$ , como se indicó antes.

La magnitud de la resistencia de una muestra de material de 1 cm<sup>2</sup> se determina, pues, mediante la resistividad. En otras palabras, cuanto mayor sea la resistividad, mayor resultará la magnitud de la resistencia correspondiente a dicha muestra. Las unidades para  $\rho$ , como se define mediante la ecuación, son:

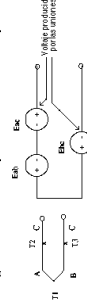
$$R = \rho l/A \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Figura 10. Resistencia de una muestra



Se puede suponer que la unidad un poco abstracta para medir la resistividad, ahora tiene una metáfora de entendimiento y claridad incidentalmente. La resistencia real de un

Figura 9. El efecto de "punta fría" en los termopares



### 3. SEMICONDUCTORES

#### 3.1 Introducción a los semiconductores

La etiqueta de semiconductor por sí misma proporciona una pista en cuanto a las características de este dispositivo. El prefijo semi se aplica por lo general a todo aquello que se encuentre a la mitad entre dos límites. El término conductor se aplica a cualquier material que permita un flujo considerable de carga debido a la aplicación de una cantidad limitada de presión externa.

Un semiconductor, por tanto, es un material que tiene un nivel de conductividad en algún lugar entre los extremos de un aislador (de muy baja conductividad) y un conductor, como el cobre, que tiene un alto nivel de conductividad. En relación inversa con la conductividad de un material, está su resistencia al flujo de carga o corriente. Esto es, cuanto mayor sea el nivel de conductividad, menor será el nivel de resistencia.

reducido los niveles de impureza en el material puro hasta 1 parte en 10 billones (1:10,000,000,000).

Cabría la pregunta de si estos niveles de impureza tan bajos son en realidad necesarios. De hecho sí, si se considera que la adición de impureza (del tipo apropiado)

Es evidente que se está trabajando con un espectro totalmente nuevo de niveles de comparación cuando se trata con el medio semiconductor. La capacidad para cambiar las características del material de manera significativa a través de este proceso, conocido como "impurificación", es incluso otra razón por la que el Ge y el Si han recibido tanta atención. Otras razones incluyen el hecho de que sus características pueden alterarse notablemente mediante la aplicación de calor y luz (una consideración importante en el desarrollo de los dispositivos sensibles a la luz, a la calor).

Algunas de las cualidades únicas del Ge y el Si señaladas se deben a su estructura atómica. Los átomos de ambos materiales forman un patrón bastante definido que es de naturaleza periódica (esto es, el mismo se repite en forma continua). Un patrón completo se denomina cristal, y el arreglo periódico de los átomos, red. En el caso de Ge y el Si, el cristal tiene la estructura tridimensional del diamante, como se muestra en la figura 11.

Como se sabe, el átomo se compone de tres partículas fundamentales: electrón, protón y neutrón. En la red atómica, los neutrones y protones forman los núcleos, en tanto que los electrones giran alrededor del núcleo en una órbita fija.

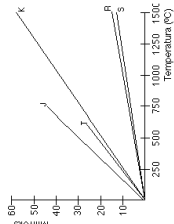
Figura 11. Estructura monocristalina del Ge, y el Si



Esto es una consecuencia lógica, ya que al tratarse de dos conductores, cuando están instalados cerca de campos magnéticos fuertes tendrán voltajes inducidos cuando su longitud sea larga. Es por ello que requieren de un acondicionador que incluya filtros que eliminen los voltajes inducidos de altas frecuencias con un transmisor adecuado cerca del lugar de medición.

Otro de los efectos indeseados es cuando se tienen voltajes parásitos debido a la unión de las terminales del termopar con otros conductores a diferente temperatura que aquella en la unión de medición. Este fenómeno se denomina "efecto de punta fría", y se presenta como una consecuencia de una violación a las leyes de la temperatura intermedia y del metal intermedio, como se muestra en la figura 7. Una forma de evitar este efecto indeseado es aprovechar otra de las leyes -la del metal intermedio- para compensar los voltajes de las uniones en la punta fría.

Figura 8. Curva temperatura-voltaje para los diferentes tipos de termopares



En la figura 9 se observa el efecto de las puntas frías sobre el voltaje de interés en la unión de los metales A y B sometida a temperatura T1. El acondicionamiento de la señal debe hacerse con compensación de punta fría.

material semiconductor medida según lo anterior se llama resistencia volumétrica. La resistencia que se introduce conociendo las puntas de conexión a un material volumétrico recibe el nombre de resistencia de contacto óhmico.

En la tabla VIII se incluyen valores comunes de resistividad correspondientes a tres amplias categorías de materiales.

Tabla VIII. Valores de la resistividad en materiales conductores, semiconductores y aisladores

--	--

Nótese en la tabla VIII la amplia gama entre los materiales conductores y los aisladores para un material de 1 cm de largo. 18 lugares separan la posición del punto decimal de un número en comparación con el otro. El Ge y el Si han recibido atención por varias razones. Una consideración muy importante es el hecho de que pueden manufacturarse con un muy alto nivel de pureza. En realidad, los últimos avances han

En años recientes, la tendencia se ha desviado firmemente hacia el silicio, aléjandose el germanio, pero éste se sigue produciendo aunque menor cantidad. Para simplificar la tecnología de semiconductores se hace alusión a estos materiales pero como se verá más adelante, es otro el material utilizado en la tecnología termoeléctrica.

Nótese en la tabla VIII la amplia gama entre los materiales conductores y los aisladores para un material de 1 cm de largo. 18 lugares separan la posición del punto decimal de un número en comparación con el otro. El Ge y el Si han recibido atención por varias razones. Una consideración muy importante es el hecho de que pueden manufacturarse con un muy alto nivel de pureza. En realidad, los últimos avances han

En la figura 3.3 se muestran los modelos de Bohr de los dos semiconductores más comúnmente usados, el germanio y el silicio.

Según se indica en la figura 12, el átomo de germanio tiene 32 electrones orbitales, en tanto que el silicio tiene 14 electrones alrededor del núcleo. En cada caso hay 4 electrones en la capa exterior (de valencia). El potencial (potencial de ionización) que se requiere para remover cualquiera de estos 4 electrones de valencia es menor que el requerido para cualquier otro electrón en la estructura. En un cristal puro de germanio o silicio, estos 4 electrones de valencia se encuentran unidos a 4 átomos adyacentes, como se muestra para el silicio en la figura 13. El Ge y el Si se dice que son átomos tetravalentes porque cada uno tiene cuatro electrones de valencia.

Este tipo de unión formado por electrones compartidos, recibe el nombre de enlace covalente. A pesar de que el enlace covalente permite una unión más fuerte entre los electrones de valencia y sus átomos padres, persiste la posibilidad de que los electrones de valencia absorban suficiente energía cinética proveniente de causas naturales para romper el enlace covalente y asumir el estado "libre".

Figura 12. Átomo de germanio



Figura 13. Enlace covalente de el silicio



Estas causas naturales incluyen efectos como la energía luminosa en forma de fotones y la energía térmica que surge del medio circundante. A la temperatura ambiente se



encuentran aproximadamente  $1.5 \times 10^{16}$  portadores libres en un centímetro cúbico de un material de silicio intrínseco. Los materiales intrínsecos son aquellos semiconductores que se han refinado con todo cuidado para reducir las impurezas a un nivel muy bajo (en esencia, con una pureza tan alta como la que puede obtenerse con la tecnología moderna). Los electrones libres en el material que se deben sólo a causas naturales se conocen como portadores intrínsecos.

A la misma temperatura, el material de germanio intrínseco tendrá cerca de  $2.5 \times$



10 portadores libres por centímetros cúbicos. La proporción del número



de portadores en el germanio con relación a los de silicio es mayor que 10, e indica que el primero es mucho mejor conductor a temperatura ambiente. Esto quizás sea cierto, pero ambos se siguen considerando malos conductores en el estado intrínseco.

Figura 14. Impurezas de antimonio en un material tipo "n".



El tipo n se crea añadiendo todos aquellos elementos de impureza que tengan cinco electrones de valencia (pentavalentes) como antimonio, arsénico y fósforo. El efecto de estas impurezas se indican en la figura 14 (empleando antimonio como impureza en una base de silicio). Nótese que los cuatro enlaces covalentes aún están presentes. Sin embargo, hay un quinto electrón adicional debido al átomo de impureza, el cual no está asociado con algún enlace covalente particular.

Este electrón sobrante, unido débilmente a su átomo padre (antimonio), se puede mover más o menos con cierta libertad dentro del material tipo n recién formado. Puesto que el átomo de impurezas insertado ha donado a la estructura un electrón relativamente "libre", las impurezas con cinco electrones de valencia se denominan átomos donadores.

Es importante reconocer que aun cuando un gran número de portadores "libres" se hayan establecido en el material tipo n, éste siga siendo eléctricamente neutro, porque idénticamente el número de protones con carga positiva en el núcleo se mantiene igual al número de electrones "libres" y orbitales con carga negativa en la estructura.

El efecto de este proceso de impurificación sobre la conductividad relativa puede describirse de mejor manera empleando el diagrama de la banda de energía de la figura 15.

Nótese en la tabla VIII que la resistividad difiere también por una proporción de 1000:1, teniendo el silicio el valor mayor. Desde luego, este debe ser el caso, ya que la resistividad y la conductividad se relacionan de manera inversa.

Un cambio en la temperatura de un material semiconductor puede incrementar en forma considerable el número de electrones libres. A medida que la temperatura aumenta desde el cero absoluto (0 K), un número creciente de electrones de valencia absorben suficiente energía térmica para romper el enlace covalente y contribuyen al número de portadores libres, como se describió anteriormente. Este número incrementado de portadores aumentará el índice de conductividad, y como resultado se producirá un nivel menor de resistencia.

Los materiales semiconductores como el Ge y el Si, que muestran una reducción de la resistencia con el aumento de la temperatura, se dice que tienen un coeficiente negativo de temperatura. La resistencia de la mayor parte de los conductores se incrementa con la temperatura. Esto se debe al hecho de que el número de portadores en un conductor no aumentará en forma considerable con la temperatura, pero su parón de vibración por encima de un punto fijo hará cada vez más difícil el paso de los electrones. Por consiguiente, un aumento en la temperatura produce un nivel incrementado de resistencia y un coeficiente positivo de temperatura.

### 3. 2 Niveles de energía

En la estructura atómica aislada existen niveles de energía discretos (individuales) asociados con cada electrón orbital. De hecho, cada material tendrá su propio conjunto de niveles de energía permisibles para los electrones en su estructura atómica.

El resultado neto es una expansión de los niveles discretos de energía de los posibles estados de energía para los electrones de valencia correspondientes a esas bandas.

Obsérvese que un nivel de energía discreto (denominado nivel donador) aparece en la banda prohibida con Eg bastante menor que la del material intrínseco. Los electrones "libres", resultado de las impurezas añadidas, se ubican en este nivel de energía y no tienen ninguna dificultad para absorber una cantidad suficiente de energía térmica para moverse hacia la banda de conducción a temperatura ambiente.

Figura 15. Efecto de las impurezas donadoras sobre la estructura de las bandas de energía



### Material tipo p

El material tipo p se forma impurificando un cristal puro de germanio o silicio con átomos de impureza que tenga tres electrones de valencia. Los elementos que se emplean con mayor frecuencia para este propósito son el boro, el galio y el indio.

Nótese que ahora hay un número insuficiente de electrones para completar los enlaces covalentes de la red recién formada. La vacante que resulta se denomina huecos y se presentan por medio de un pequeño círculo o signo positivo, debido a la ausencia de carga negativa. Puesto que la vacante resultante aceptará de inmediato un electrón "libre", las impurezas añadidas reciben el nombre de átomos aceptores. El material tipo p resultante es eléctricamente neutro, por las mismas razones que las del material tipo n.

El efecto de un hueco en la conducción se muestra en la figura 3.9. Si un electrón de valencia adquiere suficiente energía cinética para romper un enlace covalente y llenar la vacante creada por un hueco, se creará una vacante o hueco en el enlace covalente que

Nótese que aun se encuentran niveles frontera y estados de energía máximos en los que puede encontrarse cualquier electrón en la red atómica, y que persiste una región prohibida entre la banda de valencia y el nivel de ionización. La ionización es un mecanismo mediante el cual un electrón puede absorber suficiente energía para desprenderse de la estructura atómica y unirse a portadores "libres" en la banda de conducción. Se notará que la energía se mide en electrón-volts (eV).

### 3.3 Materiales extrínsecos tipo n y tipo p

Las características de los materiales semiconductores pueden alterarse de modo considerable mediante la adición de ciertos átomos de impureza en el material semiconductor relativamente puro. Estas impurezas, aunque quizás sólo se agregue 1 parte en 10 millones, pueden alterar la estructura de bandas lo suficiente como para cambiar totalmente las propiedades eléctricas del material. Un material semiconductor que se ha sometido a este proceso de impurificación se denomina material extrínseco. Hay dos materiales extrínsecos de importancia invaluable para la fabricación de dispositivos semiconductores; el tipo n y el tipo p. Cada uno se describirá con cierto detalle en los siguientes párrafos.

#### Material tipo n

Tanto los materiales tipo n como los tipo p se forman agregando un número predeterminado de átomos de impureza a una base de silicio o germanio.

liberó a ese electrón. En consecuencia, hay una transferencia de huecos hacia la izquierda y de electrones hacia la derecha, como se muestra en la figura 17. La dirección que se empleará en este capítulo es la que corresponde al flujo convencional, la cual se indica mediante la dirección del flujo de huecos.

Figura 16. Impurezas de boro en un material tipo p



Figura 3.8 Flujo de electrones contra flujo de huecos



En el estado intrínseco, el número de electrones libres en el Ge o el Si se debe sólo a aquellos pocos electrones en la banda de valencia que han adquirido suficiente energía de fuentes térmicas o luminosas para romper el enlace covalente o las pocas impurezas que podrían no haberse eliminado. Las vacantes que se quedan atrás en la estructura del enlace covalente representan el muy limitado suministro de huecos.

En un material tipo n, el número de huecos no ha cambiado de manera significativa a partir de este nivel intrínseco. El resultado neto, por lo tanto, es que el número de electrones excede en demasía el número de huecos. Por esta razón, el electrón se

denominan portador mayoritario, y el hueco, portador minoritario, como se muestra en la figura 18 (a). Advértese en la figura 18 (b) que lo inverso se cumple para el material tipo p cuando el quinto electrón de un átomo donador abandona al átomo padre, el átomo que permanece adquiere una carga positiva neutra: a esto se debe el signo positivo en la representación fon donador. Por razones similares, el signo negativo aparece en el fon acceptor.

Figura 18. (a) material tipo n; (b) material tipo p



En base a lo estudiado anteriormente, se puede analizar a través de los materiales semiconductores la relevancia que poseen dicha tecnología en el efecto Peltier y el despegue de lo que después será conocido como termoelectricidad.

En un conductor se produce una fácil transmisión de corriente eléctrica hacia un sentido, pero si se quiere que la corriente circule en sentido contrario, existe una fuerte oposición. Debido a esta característica de los materiales conductores resultaba una limitación al efecto Peltier (debido a que es reversible) como método de producción del frío antes de la aparición de los materiales semiconductores.

La limitación era debida a que en un conductor si se hace pasar corriente hacia un sentido y se calienta, para que se enfríe se ha de hacer pasar la corriente en sentido contrario y así producir frío. Pero al ser un conductor, por sus características ofrece resistencia al paso de corriente en sentido contrario, por lo tanto, la corriente que circulará será muy pequeña y no enfriará casi nada. Con los semiconductores, esta limitación desaparece.

Vamos cuales son las características de esta diferencia: la corriente en un metal (conductor) se debe al flujo de electrones que se mueven libremente; estos son aportados al menos uno por cada uno de los átomos que lo forman.

En un semiconductor, sólo algunos átomos (no todos), los que participan en la nube electrónica, aportan electrones, dando como resultado menos corriente, cientos o miles de veces menor que en los conductores, o en otras palabras, presentan una conductividad menor. Cuando un extremo de un conductor (o semiconductor) se encuentra a una temperatura superior al opuesto, es decir en el conductor hay un gradiente de temperatura, los electrones del extremo caliente abandonan en mayor cantidad que los del extremo frío su lado, esto hace que en el extremo frío progresivamente haya un almacenamiento de electrones (carga negativa), lo que provoca que se repelen a los electrones que siguen llegando hasta que se consigue un equilibrio en el intercambio de electrones, quedando el extremo frío cargado negativamente.

Cuanto menor sea el flujo de electrones que se produce, mayor será el voltaje que alcanzará el extremo frío antes de llegar al equilibrio; es una relación inversamente proporcional entre el voltaje y el número de electrones.

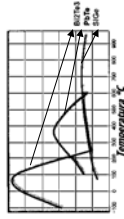
Dado que los materiales semiconductores tienen menos electrones libres, el voltaje al termoelectrónico (que es directamente proporcional al voltaje y a la corriente). Los conductores, en cambio, al tener más electrones libres, alcanzan menor voltaje por lo que su potencial termoelectrónico es menor.

En las últimas décadas no ha habido cambios en las *figuras de mérito* (Z) de los materiales en función de la temperatura (T), sin grandes mejoras de las mismas, el valor de ZT se mueve en torno a la magnitud mágica de las figuras termoelectrónicas de ZT=1.

También, debido a la anisotropía, este material presenta propiedades que lo harían fragmentarse en forma de láminas, como lo haría la mica, por ejemplo. Pero si se monta en la misma dirección que favorece el flujo de corriente, este problema desaparece.

El Teluro de Bismuto se produce en forma de lingotes que después se desensambian en láminas de diversos grosores. Después de que las superficies de estas láminas han sido convenientemente pulidas, se cortan para conseguir los bloques o elementos que se ensamblarán para formar una célula termoelectrónica.

Figura 19. Figura de mérito en función de la temperatura



Tomado del libro Heat pipes y termoelectricidad, por Maitea Casals

### 3.4 Teluro de Bismuto

El Teluro de Bismuto cristalino se tiene que manipular con mucho cuidado debido a sus peculiares propiedades.

Por su estructura cristalina, es bastante anisotrópico. La resistividad eléctrica es cuatro veces más grande paralelamente al eje de crecimiento del cristal que perpendicularmente al mismo.

También la conductividad térmica es dos veces mayor perpendicularmente al eje de crecimiento que en perpendicular al mismo. Así pues, la mejor figura de mérito se obtendrá cuando la corriente fluya paralelamente a la dirección de crecimiento del cristal. Es por eso que los bloques de semiconductor se tienen que montar en la dirección de crecimiento del cristal perpendicular a las placas cerámicas que limitan el dispositivo termoelectrónico.

De ello se deduce que mejorar la figura de mérito de estos a través de los electrones y la estructura de la sustancia de los fonones es muy difícil de que ocurra. Siendo cada vez más obvio que el progreso de los materiales termoelectrónicos está relacionado a materiales no homogéneos. En estas sustancias es muy posible que tengan lugar los efectos termoelectrónicos tridimensionales.

Experimentalmente, la presencia de un efecto tridimensional del gradiente térmico se demostró por primera vez utilizando muestras de germanio, por el Dr. P.L. Baranaky en 1958. El Dr. Reich A.D. escribió un artículo en 1972, en el que hablaba sobre la obtención de un salto térmico de 80°C utilizando termoelementos no homogéneos.

La aportación más importante en elementos no homogéneos fue desarrollada por los Drs. Semeniak V.A., Väinär A.L., Lukishker E.M. y Kolomoets N.V. Sobre este tema, puede consultarse el libro editado por los Drs. Ananyukh L.I. y Semeniak V.A. "Optimal control of Thermoelectric materials and devices characteristics". Chernovsy, Prnt 1992, p.264.

Los materiales que actualmente más se utilizan en la construcción de módulos termoelectrónicos son el Bi-Te, Pb-Te y PbSe. Los métodos más usados para su fabricación es la cristalización direccional obtenida a partir del material fundido. Cabe destacar que el comportamiento de estos materiales varía según la temperatura a que estén expuestos. En la figura 19, esto se puede apreciar comparando las figuras de mérito (Z) en función de la temperatura (T). Se observa que el *Teluro de Bismuto* es el mejor dentro del rango de temperaturas para los efectos que aquí interesan.

## 4. TEMPERATURA

### 4.1 Unidades eléctricas

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

#### Unidades SI

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

Las unidades también tienen las siguientes definiciones prácticas, empleadas para calibrar instrumentos, el amperio es la cantidad de electricidad que deposita 0,001118 gramos de plata por segundo en uno de los electrodos, si se hace pasar a través de una solución de nitrato de plata.

El voltio es la fuerza electromotriz necesaria para producir una corriente de 1 amperio a través de una resistencia de 1 ohmio, que a su vez se define como la resistencia eléctrica de una columna de mercurio de 106,3 cm de altura y 1 mm<sup>2</sup> de sección transversal a una temperatura de 0 °C.

El voltio también se define a partir de una pila voltaica patrón, la denominada pila de Weston, con pólos de amalgama de cadmio y sulfato de mercurio (I) y un electrolito de sulfato de cadmio. El voltio se define como 0,98203 veces el potencial de esta pila patrón a 20 °C.

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

**Tabla IX. Dimensiones y unidades características del Sistema Internacional**

--

**4.2 Teoría básica resistencia, capacidad e inductancia**

--

Ecuación 4.2

Que en general, teniendo en cuenta el efecto termoelectrónico sobre el campo eléctrico,  $E = \nabla V$ , puede ponerse como:

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

--

Ecuación 4.3

definiendo el coeficiente Seebeck como:

--

S = Ecuación 4.4

El calor absorbido por unidad de volumen ( $\Delta dx$ ) por el circuito cuando pasa por una corriente eléctrica de densidad  $J$  viene dado por:

--

Todos los componentes de un circuito eléctrico exhiben en mayor o menor medida una cierta resistencia, capacidad e inductancia. La unidad de resistencia comúnmente usada es el ohmio ( $\Omega$ ), que es la resistencia de un conductor en el que una diferencia de potencial de 1 voltio produce una corriente de 1 amperio.

La capacidad de un condensador se mide en faradios: un condensador de 1 faradio ( $F$ ) tiene una diferencia de potencial entre sus placas de 1 voltio cuando éstas presentan una carga de 1 culombio. La unidad de inductancia es el henrio ( $H$ ). Una bobina tiene una autoinductancia de 1 henrio cuando un cambio de 1 amperio/segundo en la corriente eléctrica que fluye a través de ella provoca una fuerza electromotriz opuesta de 1 voltio.

Un transformador, o dos circuitos cualesquiera magnéticamente acoplados, tienen una inductancia mutua de 1 henrio cuando un cambio de 1 amperio por segundo en la corriente del circuito primario induce una tensión de un voltio en el secundario.

**4.3 Efecto de la variación de la temperatura en los dispositivos termoelectrónicos**

Los dispositivos termoelectrónicos están sometidos, principalmente, a cuatro efectos físicos: el efecto Seebeck, el efecto Peltier, el efecto Thomson y el efecto Joule. El efecto Seebeck es la f.e.m. generada cuando dos bloques de un módulo termoelectrónico se mantienen a distinta temperatura.

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

El efecto Thomson consiste en el calentamiento o enfriamiento producido cuando una

--

Ecuación 4.5

También se puede escribir como

--

Ecuación 4.6

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

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

--

Ecuación 4.7

Integrando en una soldadura el primer término, tenemos:

--

Ecuación 4.8

corriente eléctrica pasa a través de un conductor homogéneo en la dirección del gradiente de temperatura.

El efecto Joule consiste en el calentamiento producido cuando una corriente eléctrica pasa a través de un conductor. El efecto Joule es un proceso irreversible a diferencia de los efectos Seebeck, Peltier y Thomson, que son fenómenos reversibles.

En las condiciones de trabajo de las placas termoelectrónicas hay otro proceso irreversible que es la conducción térmica.

**4.4 Fundamentos de la teoría termoelectrónica**

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

**Figura 20. Variaciones de temperatura**

--

La diferencia de potencial,  $V$  entre los bornes 1 y 2 de un convertidor termoelectrónico, tal como se indica en la figura 20, puede escribirse a partir de la definición de un potencial en función de la fuerza que representa:

--

Ecuación 4.1 como:

Y por lo tanto:

--

Ecuación 4.9

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

El calor producido por los efectos Peltier y Thomson es:

--

Ecuación 4.10

Y el trabajo, producido por efecto Seebeck:

--

Ecuación 4.11

Aplicando también el segundo principio de la termodinámica de procesos reversibles, que expresa que la variación de la entropía es nula,  $dS = 0$ , obtenemos las relaciones de Kelvin:

--	--	--

Ecuación 4.12

Ecuación 4.13

#### 4.5 Balance térmico en una placa termoelectrica

Se describió la teoría de los dispositivos termoelectricos, desarrollada desde su descubrimiento por Seebeck y Peltier en 1822 y 1834. También se discutieron algunos avances tecnológicos que han permitido el uso comercial del enfriamiento termoelectrico. Se describen los principios fundamentales de termodinámica usados para los cálculos de transferencia térmica y con más detalle la descripción del funcionamiento de una placa termoelectrica y su selección para una aplicación dada. Funcionamiento y diseño de un Elemento Termoelectrico (ETE):

Figura 21. Elemento termoelectrico



Tomado del libro Heat pipes y termoelectricidad por Maitena Casals

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

Figura 22. Célula de efecto peltier

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

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

$$S = \dots$$

Ecuación 4.14

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

$$S = \dots$$

Ecuación 4.15

Y otro Peltier;

$$S = \dots$$

Ecuación 4.16

Que están relacionados mediante la primera relación de Kelvin.

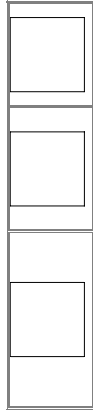


Tomado del libro Heat pipes y termoelectricidad por Maitena Casals

De forma parecida, debido al efecto Peltier, si se hace pasar una corriente por el circuito de uniones semiconductoras p-n y p-p, unas se calientan y otras se enfrían, produciéndose un gradiente de temperatura entre las placas. El ETE consta de un número variable de soldaduras bobocadas en serie eléctricamente, pero en paralelo desde el punto de vista térmico actúa como una pequeña bomba de calor en estado sólido. n función de las características de la refrigeración termoelectrica expuestas, el campo de estudio y aplicación de ésta es muy amplio. Es posible el estudio de aplicaciones concretas tales como: refrigeración de cuadros eléctricos y refrigeración de frigoríficos portátiles.

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

Figura 23. Sistemas de montaje termoelectrico



Tomado de la página WWW.arnakab.es año 2000.

Un ETE, ver figura 23, estará compuesto por un conjunto de células termoelectricas fijadas sobre un sistema de disipación (fuente caliente), compuesto por un dissipador y un conjunto de ventiladores.

conjunto de ventiladores, cuya misión es la de evacuar por convección forzada la mayor cantidad de calor posible.

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

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

El rendimiento del equipo refrigerante termoelectrico irá en función de varios factores, como el buen asentamiento de las células termoelectricas tanto en el dissipador del lado caliente como en el bloque de ajuste, para evitar pérdidas.

En cuanto a los dissipadores, deben poseer un coeficiente de conductividad adecuado y una superficie lo más grande posible, para que la evacuación de calor sea efectiva, procurando al dissipador de calor una convección forzada suficiente para facilitar la emisión de calor al exterior, porque cuanto más baja mantengamos la temperatura del lado caliente menores temperaturas obtendremos en lado frío. Dado que el salto térmico de las células termoelectricas permanece aproximadamente constante, también es importante calcular la intensidad de funcionamiento óptimo para obtener el máximo rendimiento.

Esto es de fundamental importancia para poder competir en mercados internacionales, debido a la gran sensibilidad del rendimiento de los sistemas en función del montaje idóneo.

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

Dentro de la instalación termoelectrica frigorifica conviene definir un parametro, en función de las características especificas de los elementos empleados como conductores en dicha instalación, y buscar la relación de éste con el rendimiento térmico de la instalación. Para esto es necesario el estudio de la figura 19 y la figura 28, la cual, para el propósito de este capítulo, es el estudio de curvas de rendimiento en materiales termoelectricos.

Como antes se ha mencionado, la instalación termoelectrica, tal como se ve en la figura mencionada, es un circuito termoelectrico al que se le aplica una diferencia de potencial de una fuente externa, apareciendo una cesión de calor por unidad de tiempo a la fuente caliente igual a:

$$Q_c = \dots$$

Ecuación 4.17

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

$$Q_f = \dots$$

Ecuación 4.18

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

$$Q_c = \dots$$

Ecuación 4.19

Donde R es la resistencia promedio de los conductores.

La pérdida de calor por conducción de la junta caliente a la junta fría ocurre siempre por una combinación de la conducción a través de los distintos materiales que forman la placa o elemento termoelectrico y la convección entre los huecos de la misma.

$$Q_c = \dots$$

Ecuación 4.20

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

$$Q_c = \dots$$

Ecuación 4.21

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

$$\text{Ecuación 4.22}$$

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

$$\text{Ecuación 4.23}$$

Y se tiene aplicando el primer principio de la termodinámica, que la potencia eléctrica será la diferencia de ambas expresiones, es decir, que se escriben dos modos de operación básicos para las bombas de calor, que son:

- De máximo bombeo de calor o máxima refrigeración y
- De máximo rendimiento o COP (*Coefficient of Performance*).

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

$$\text{Ecuación 4.24}$$

$$\text{Ecuación 4.25}$$

El máximo sitio térmico se puede obtener introduciendo la Imax en la expresión del calor neto e igualándolo a cero, ya que así, cuando el calor producido por efecto Peltier,

equilibre la disipación en el lado frío por efecto Joule más el flujo de calor por conducción a través de la placa, se habrá alcanzado la máxima diferencia de temperatura entre el lado caliente y frío de la placa. Y despreciando el salto máximo de temperatura, tenemos:

$$\text{Ecuación 4.26}$$

$$\text{Ecuación 4.27}$$

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

$$\text{COP} = \{ Q_{net} / \text{over } P \} \text{ (Ecuación 4.28)}$$

Que expresado en función de los distintos términos, puede expresarse como:

$$\text{COP} = \{ S \cdot T_{c1} - (1 \text{ over } 2) \cdot R \cdot I^2 - \kappa \cdot (T_{c1} - T_{c2}) \} \text{ over } R \cdot I^2 + S \cdot (T_{c1} - T_{c2}) \} \text{ (Ecuación 4.29)}$$

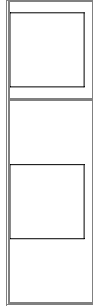
Podríamos obtener el COP<sub>max</sub>, diferenciando con respecto a la intensidad, igualando a cero, este máximo corresponde a la intensidad L<sub>cop</sub> que puede expresarse como:

$$L_{cop} = \{ \kappa \cdot (T_{c1} - T_{c2}) \} \text{ over } (1 \text{ over } 2) \cdot S \cdot (T_{c1} + T_{c2}) \} \cdot [(1 + (1 \text{ over } 2) \cdot Z \cdot (T_{c1} + T_{c2})) \text{ over } (1/2) + 1] \text{ (Ecuación 4.30)}$$

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

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

Figura 26. (a) Placas de efecto Peltier, (b) Placa de efecto Seebeck



Tomado de la página WWW.zamkiss.abc.2000.

Las placas multinivel nos permiten conseguir salos térmicos importantes frente a la temperatura ambiente, pudiendo llegar incluso a diferencias de 130°C.

Las potencias a disipar, a medida que aumentamos los gradientes térmicos, son cada vez menores, pero las ventajas de poder refrigerar puntualmente son muy importantes.

Figura 27. Placa multinivel 130°C

Introduciendo la intensidad obtenida, L<sub>cop</sub>, dada en la expresión del COP, obtenemos:

$$\text{COP}_{max} = \{ (1 + (1 \text{ over } 2) \cdot Z \cdot (T_{c1} + T_{c2})) \text{ over } (1/2) - T_{c1} / T_{c2} \} \text{ over } (1 + (1 \text{ over } 2) \cdot Z \cdot (T_{c1} + T_{c2})) \text{ over } (1/2) + 1 \} \cdot (T_{c2} \text{ over } T_{c1} - T_{c2}) \} \text{ (Ecuación 4.31)}$$

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

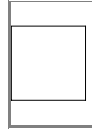
Estos cálculos son de gran importancia para el correcto diseño de un sistema termoelectrónico, y pueden ajustarse para trabajar, bien a máximo COP o bien a máxima refrigeración. El ajuste de las intensidades de funcionamiento dependerá del uso que se le quiera dar a la aplicación.

#### Descripción de una placa termoelectrónica

Una célula o placa termoelectrónica está constituida por una serie de elementos semiconductor de tipos N y P, que están dispuestos sobre una superficie cerámica, eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo.

El número de semiconductores siempre es impar, y los más utilizados forman un conjunto de 7-31-71-127 elementos.

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



Tomado de la página WWW.zamkiss.abc.2000.

#### Cálculos

Seguidamente se desarrollará el cálculo de la potencia calorífica en células termoelectrónicas, utilizando propiedades de transporte promediadas.

Se va a suponer que en el funcionamiento de las células termoelectrónicas sólo hay flujo de calor en la dirección de las x, es decir, sólo hay flujo de calor a través de los pares termoelectrónicos. Además, todo el flujo de calor pasa por las placas metálicas entre las que están los pares termoelectrónicos. Se va a considerar uno de estos pares termoelectrónicos para encontrar una fórmula que dé tanto el calor extraído del foco frío por una célula termoelectrónica,  $\{ ( \text{dot } Q )_{\text{cél}} \}$ , como el calor suministrado al foco caliente también por una célula termoelectrónica,  $\{ ( \text{dot } Q )_{\text{hc}} \}$ .

#### 4.6 Análisis de los transitorios en la operatividad de módulos termoelectrónicos

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

Tipo de placas (efecto Seebeck – efecto Peltier)

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

$$m \cdot c \cdot (dT \text{ over } dt) = Q_{\text{net}} \quad (\text{Ecuación 4.32})$$

De donde:  $T$  es la temperatura,  $t$  es el tiempo,  $Q$  el calor externo y  $Q_C$  el calor bombeado por el ETE,  $m$  es la masa de la placa que se refrigera y  $c$  el calor específico de la placa del módulo.

En la ecuación adjunta podemos sustituir, tomando en cuenta la ecuación (30) y que existen diferencias entre un estado continuado y estados transitorios: ésta es una suposición muy crítica, pero que ha sido verificada experimentalmente.

$$m \cdot c \cdot (dT \text{ over } dt) = Q_{\text{net}} = (S \cdot T_{\text{e}} - (S \cdot T_{\text{h}} - \{1 \text{ over } 2\} R_{\text{int}} \cdot \kappa_{\text{placa}} \cdot \Delta T)) \quad (\text{ec.4.33})$$

Simplificando y separando las variables podemos expresarla eq (4.33) como:

$$(dT \text{ over } T_{\text{e}}) = (S \cdot (T_{\text{e}} - T_{\text{h}}) + \kappa_{\text{placa}} \text{ over } m \cdot c) \cdot dt \quad (\text{Ecuación 4.34})$$

En integración;

$$T = (T_0 - T_{\text{e}}) \cdot e^{-\kappa_{\text{placa}} \cdot (S \cdot T_{\text{e}} - (S \cdot T_{\text{h}} - \{1 \text{ over } 2\} R_{\text{int}} \cdot \kappa_{\text{placa}} \cdot \Delta T)) / m \cdot c} + T_{\text{e}} \quad (\text{Ecuación 4.35})$$

Al término  $(m \cdot c \text{ over } S \cdot (T_{\text{e}} - T_{\text{h}}) + \kappa_{\text{placa}})$  le llamamos constante temporal, pero en este caso todos los términos son dependientes de la temperatura y tendrán valores constantes sólo en puntos fijos para ciertas temperaturas, y algunos valores estables de intensidad de corriente. Aproximadamente el valor que encontramos para el módulo de prueba es de 10 a 20 segundos. (Según la ecuación 4.32). Los cambios de temperatura se midieron cada

La transferencia de energía tiene lugar en forma de flujo calorífico entre las dos caras de los semiconductores.

### 5.3 Ecuaciones de la célula Peltier

Son varios los fenómenos que acontecen dentro de una célula Peltier, pudiéndose enunciar los efectos Peltier, Thomson y Joule, además de las propias características de la transmisión de calor. Sin embargo, dichos procesos no son todos de igual magnitud e importancia. De hecho, en el rango de temperaturas de los experimentos a realizar, se puede despreciar el flujo calorífico producido por la circulación de la corriente eléctrica con variación de temperatura, esto es, el denominado efecto Thomson. Así que, tomando en cuenta esta simplificación, al aplicar una diferencia de potencial sobre la célula, se producirá una cesión de calor por unidad de tiempo en la cara caliente igual a:

$$\dot{Q}_{\text{caliente}} = \alpha \cdot I^2 \cdot R_{\text{placa}} + I \cdot \Delta T_{\text{Peltier}} \quad (\text{Ecuación 5.1})$$

Donde  $T_{\text{e}}$  es la temperatura de la cara caliente,  $\alpha$  es el coeficiente Seebeck  $c / \text{la}$  corriente que atraviesa al circuito. Por el mismo efecto, la absorción de calor por unidad de tiempo en la cara fría será:

$$\dot{Q}_{\text{fría}} = \alpha \cdot I^2 \cdot R_{\text{placa}} - I \cdot \Delta T_{\text{Peltier}} \quad (\text{Ecuación 5.2})$$

Siendo  $T_{\text{h}}$  la temperatura de la cara fría. De otro lado, si se consideran las pérdidas

cinco segundos y esos fueron los valores de las temperaturas que se utilizaron en cada momento. Las ecuaciones para determinar las temperaturas calientes se pueden derivar de la misma manera tal como se muestran a continuación:

La temperatura en estado estacionario  $T_{\text{e}}$  viene dada por:

$$T_{\text{e}} = \frac{Q_{\text{h}} + Q_{\text{J}} + \kappa_{\text{placa}} \cdot (T_{\text{h}} - T_{\text{e}})}{S + \kappa_{\text{placa}}} \quad (\text{Ecuación 4.36})$$

La temperatura del transitorio es por tanto;

$$T = T_{\text{e}} + (T_0 - T_{\text{e}}) \cdot e^{-\kappa_{\text{placa}} \cdot (S + \kappa_{\text{placa}}) \cdot t / m \cdot c} \quad (\text{Ecuación 4.37}) \text{ mo el H}_2\text{O (hielo, estado sólido; agua: estado líquido; vapor: estado gaseoso)}$$

Figura 28. Figura de mérito, curvas de rendimiento



Tomado de la página WWW.ambalasa.año 2000.

## 5. ARQUITECTURA DE LA CÉLULA TERMOELÉCTRICA

por unidad de tiempo por efecto Joule, las cuales se supone que se reparten mitad para cada cara, éstas quedarán expresadas por:

$$\dot{Q}_{\text{Joule}} = I^2 \cdot R_{\text{placa}} \quad (\text{Ecuación 5.3})$$

Donde  $R_{\text{placa}}$  es la resistencia eléctrica de la célula Peltier. La diferencia de temperaturas entre ambas caras producirá un efecto de conducción térmica entre la cara caliente y la cara fría, cuantificable como:

$$\dot{Q}_{\text{conducción}} = \kappa_{\text{placa}} \cdot (T_{\text{h}} - T_{\text{e}}) \quad (\text{Ecuación 5.4})$$

En donde  $R_{\text{placa}}$  representa la resistencia térmica entre la cara caliente y la fría. El flujo neto calorífico absorbido por la cara fría, será haciendo el balance energético a:

$$\dot{Q}_{\text{fría}} = \alpha \cdot I^2 \cdot R_{\text{placa}} - I \cdot \Delta T_{\text{Peltier}} - \kappa_{\text{placa}} \cdot (T_{\text{h}} - T_{\text{e}}) \quad (\text{Ecuación 5.5})$$

Mientras que el calor cedido y que debe ser disipado a través de la cara caliente será igual a:

$$\dot{Q}_{\text{caliente}} = \alpha \cdot I^2 \cdot R_{\text{placa}} + I \cdot \Delta T_{\text{Peltier}} + \kappa_{\text{placa}} \cdot (T_{\text{h}} - T_{\text{e}}) \quad (\text{Ecuación 5.6})$$

### 5.1 Modelado de una célula Peltier

Las células Peltier son unos dispositivos termoelectrónicos que se caracterizan por la aparición de una diferencia de temperatura entre las dos caras de un semiconductor cuando por él circula una corriente.

Ésta es una alternativa a la clásica refrigeración mediante compresión de vapores con cambio de fase, en la que se establece un determinado ciclo para un gas que es comprimido para su posterior expansión, con la correspondiente absorción de calor. Como consecuencia, en todo circuito frigorífico se requiere de un condensador, evaporador, circuito de expansión y refrigerantes.

La refrigeración termoelectrónica supone una alternativa a los sistemas utilizados habitualmente. Los principales fenómenos físicos que intervienen son los efectos: Seebeck, Peltier, Thomson y Joule.

### 5.2 El comportamiento de las células Peltier

Si bien el efecto Peltier es conocido desde 1834, su aplicación práctica necesitó del desarrollo de los semiconductores, pues éstos resultan ser buenos conductores de la electricidad pero pobres conductores del calor.

La circulación de una corriente eléctrica a través de dos materiales semiconductores con diferente densidad de electrones libres, produce que se libere o se absorba energía.

Aplicando el primer principio de la termodinámica, resultará que la potencia eléctrica suministrada será la diferencia entre los flujos caloríficos de disipación y de absorción, considerando que:

$$P_{\text{eléctrica}} = \dot{Q}_{\text{caliente}} - \dot{Q}_{\text{fría}} \quad (\text{Ecuación 5.7})$$

Si se considera despreciable el efecto Thomson y considerando sólo los valores medios de las propiedades de transporte del calor. El coeficiente de Seebeck, la resistividad eléctrica y la conductividad térmica varían con la temperatura.

Se ha verificado que para el rango de temperaturas de las prácticas, éstos pueden ser considerados constantes. Además, el fabricante de las células empleadas, MELCOR, también emplea expresiones similares.

### 5.4 Modelado del comportamiento dinámico

Un análisis exhaustivo del fenómeno termoelectrónico en las células Peltier resulta bastante difícil de conseguir, incluso para problemas reducidos del régimen dinámico en los que se requiere distintas presunciones, tales como las propiedades promedio de los módulos. Con este fin, se va a proceder a buscar un símil térmico eléctrico que facilite la comprensión del modelo y sus simplificaciones. La figura 29 esquematiza las ecuaciones 5.5 y 5.6, reflejando los efectos Peltier y Joule junto con los de la transmisión de calor.

Obsérvese que la referencia a masa indica el punto de reposo de la temperatura en ambas caras, esto es, la temperatura ambiente.

Figura 29. Símil térmico-eléctrico equivalente



Por otra parte, los flujos caloríficos absorbidos por la cara fría y los disipados por la cara caliente, pueden ser modelados como capacidades caloríficas, las cuales reflejarán las inercias térmicas de ambas caras (ver figura.30).

Sin duda alguna, la inserción de un disipador adosado a la cara caliente de la célula, con alta conductividad térmica, y al que se le ha añadido, además, un circuito de convección forzada, garantizará que la temperatura de la cara caliente,  $T_C$ , se mantenga prácticamente constante y próxima a la temperatura ambiente. El circuito de disipación térmica adosado a la Peltier quedará modelado por una gran capacidad calorífica. Se ha cuantificado las capacidades térmicas equivalentes  $C_f$  y  $C_c$ ; siendo  $C_c$  mayor en más de dos órdenes de magnitud respecto de  $C_f$ .

Figura 30. Circuito térmico-eléctrico equivalente



En estas condiciones, el equivalente Norton entre las dos caras se reducirá a una capacidad térmica de valor  $C_f$  en paralelo con una fuente de flujo calorífico de valor



o bien aplicando la ec. 5.7,

## 6. DISPACIÓN DE CALOR EN DISPOSITIVOS TERMOELÉCTRICOS

### 6.1 Introducción a la disipación de calor

Al circular una corriente eléctrica por un semiconductor se producen pérdidas en forma de calor que elevan la temperatura del semiconductor. Para evitar que éste alcance temperaturas demasiado elevadas estropeándose o saturándose, se debe disponer de un camino de evacuación del calor hacia el exterior. Esta evacuación de calor se puede realizar por conducción a través de un radiador de calor (normalmente un perfil extrusionado de aluminio), o por convección y radiación.

En otras palabras, un TEC (célula termoeléctrica) no es capaz de absorber toda la energía que se le aplica, de hecho, ya se ha dicho que actúa como una bomba de calor, moviendo calor de un lado al otro. Que se reduzca la temperatura en la cara fría y aumente la de la cara caliente significa que el calor fluye por la placa. Este calor debe evacuaarse por algún sitio, y para realizar esta acción es necesaria la presencia de un disipador. Como se ha ido presentando en este trabajo, hay varios elementos capaces de hacer esta función: radiadores por convección natural, radiadores por convección forzada, radiadores refrigerados por líquido interno. Estos tienen que ser capaces de absorber el calor generado por la propia célula al bombear, así como el producido por efecto Joule debido a la corriente que se suministra al dispositivo.

quedará como:

Figura 31. Circuitos equivalente simplificados



Cuyas expresiones matemáticas quedarán definidas por:



Ecuaciones 5.8 y 5.9

### 5.5 Modelo simplificado

Partiendo de la ec. 5.8 y considerando que la temperatura de la cara caliente se mantiene prácticamente constante (gracias al diseño de disipación de calor aplicado a esta cara), y que el efecto Joule es de segundo orden respecto al efecto Peltier, se puede concluir que la variación de temperatura es proporcional a la intensidad que circula por la célula. El coeficiente Seebeck se mantiene prácticamente constante en todo el rango de temperatura de los experimentos. La validación de la propuesta queda reflejada en la figura 32, al compararse la respuesta en régimen permanente con la del modelo propuesto.

Figura 32. Relación entre la corriente eléctrica y la diferencia de temperaturas entre las dos caras de una célula termoeléctrica



El elemento de disipación del calor se considera parte del sistema termoeléctrico y es un elemento de gran importancia, ya que de sus prestaciones depende la temperatura de la cara caliente y, por lo tanto, el rendimiento de todo el sistema. Su diseño es una parte clave dentro del proceso global de implementación del sistema.

Tendremos que elegir un elemento capaz de absorber la potencia necesaria con un incremento de temperatura respecto la temperatura ambiente aceptable. Este incremento tiene que ser mínimo, en aplicaciones termoeléctricas se considera que un valor óptimo es de 5 a 15°C por encima de la temperatura ambiente.

En sistemas donde la potencia a disipar sea mínima, será sólo necesario utilizar un radiador (con ventilador o no).

### Las aletas

Para mejorar la eficacia de cualquier disipador se debe ampliar su superficie exterior y esto se consigue con aletas. Estas ayudan a incrementar la transmisión de calor y los disipadores pasan a llamarse de superficie ampliada.

Figura 33. Diferentes tipos de aletas



Tomado de la página [WWW.arnoldas.com](http://WWW.arnoldas.com) año 2000.

Las aletas pueden ser de distintas formas (según se ve en la figura 6.1): longitudinales, transversales, tubos aplastados con aletas continuas, etc. Pueden ser del mismo material del que están consumidos los tubos o la base o bien de otro distinto, aunque en cualquier

La FDT simplificada se puede exponer como:



Ecuación 5.10

De estas reflexiones se deduce que el mejor control sobre una célula Peltier viene dado por el empleo de un amplificador de transconductancia.

caso debe asegurarse un buen contacto entre la masa y la aleta. En los radiadores, siempre son del mismo material que la base.

Las aletas son muy utilizadas en procesos en los que intervienen fluidos malos conductores, por ejemplo, los gases.

No siempre una aleta va a mejorar sensiblemente la transmisión de calor, ya que esto depende de cuál es la resistencia que más afecta a dicha transmisión. Así, si se supone la ecuación general:



Ecuación 6.1

Donde:

$U$  es el coeficiente global de transmisión de calor referido al área interna  
 $h_e$  es el coeficiente individual de transmisión de calor por convección en el fluido externo.

$h_i$  es el coeficiente individual de transmisión de calor por convección en el fluido interno.

$K$  es la conductividad térmica del material del intercambiador y de la aleta.

$A_i$  es el área interna del intercambiador de calor.

$A_e$  es el área externa del intercambiador de calor.

$A_1$  es el área media logarítmica entre  $A_i$  y  $A_e$ .

$e$  es el espesor del tubo del que se sujetan las aletas.

### Modelo matemático para el cálculo de una aleta

De los diferentes tipos de aletas existentes, sólo se estudiará el problema de aletas



longitudinales (en la figura 6.1 corresponde al dibujo de la derecha). Para los otros tipos, el planteamiento es análogo, aunque el cálculo matemático no se ha resuelto en todos los casos por su dificultad.

Si se considera una aleta tal como la mostrada en la figura 6.2, en la que la temperatura en la base de la aleta  $T_b$  permanece constante, puede plantearse un balance energético con las siguientes suposiciones:

- La transmisión de calor por conducción a lo largo de la aleta sólo se realiza en la dirección radial, por lo que la temperatura sólo es función de esta coordenada.

- La aleta sólo disipa calor por convección hacia el exterior a lo largo de toda ella, y no lo hace por sus bordes. Es decir, sólo por las áreas  $(L \times M)$  hacia los lados. No consideramos, pues, la transferencia de calor al exterior por radiación.

- Para cualquier punto de la aleta con una temperatura  $T$ , la densidad de flujo de calor disipado al exterior se expresa como:

$$\text{Ecuación 6.2}$$

dónde:

$T_s$  es la temperatura del fluido exterior

Al realizar un balance energético en un elemento diferencial de volumen de espesor  $x$

$$\text{Ecuación 6.8}$$

La integración de esta ecuación conduce a la ecuación:

$$\text{Ecuación 6.9}$$

Esta ecuación puede expresarse de forma gráfica (ver figura 35), representando la eficacia frente al producto adimensional  $(2h/Lk)^{1/2}$ . Puede observarse que el valor de este producto depende de la relación  $h_c/h_k$  de tal forma que cuando es pequeño, la eficacia de la aleta tiende a la unidad. En cambio, cuando los valores de  $h_c$  son elevados, la eficacia desciende a valores muy bajos, con lo que la utilización de aletas no es necesaria ni eficaz, tal como se había indicado anteriormente.

Figura 35. Eficacia de aletas longitudinales



Gráfica extraída del libro Head Pipes y termoelectricidad, por Jane Mariom Casak.

En la expresión que define la eficacia aparece el incremento de temperaturas entre una determinada sección y la del exterior del fluido, de modo que:

de aleta, se obtiene:

$$\text{Ecuación 6.3}$$

Y si se divide esta expresión por  $(M_b \cdot x)$  y se toma el límite para  $x \rightarrow 0$  resulta la expresión:

$$\text{Ecuación 6.4}$$

Figura 34. Aleta longitudinal Características geométricas



Gráfica extraída del libro Head Pipes y termoelectricidad, por Jane Mariom Casak.

Teniendo presente que la densidad de flujo de calor según la ley de Fourier es:

$$\text{Ecuación 6.5}$$

$$\text{Ecuación 6.10}$$

$T$  va variando desde la base de la aleta hasta su extremo, es por ello que la solución verdadera de la integral anterior debe tener presente esta particularidad, y es lo que se ha realizado al obtener la expresión anterior de la eficacia. Sin embargo, si se utiliza un promedio de la diferencia de temperaturas entre la aleta y el fluido:

$$\text{Ecuación 6.11}$$

Siendo  $T_m$  una temperatura media de la aleta, la integración de la expresión de la eficacia será:

$$\text{Ecuación 6.12}$$

## 6.2 Los radiadores

Las pérdidas medias que se producen en un semiconductor funcionando a la frecuencia de red son:

La expresión anterior conduce a la ecuación:

$$\text{Ecuación 6.6}$$

Y esta ecuación en variables separables puede integrarse según las condiciones de contorno; para  $x = 0$ ,  $T = T_b$  y para  $x = L$ ,  $(dT/dx) = 0$  (condición de máximo o mínimo).

La integración de la ecuación diferencial con estas condiciones de contorno conduce a la expresión:

$$\text{Ecuación 6.7}$$

## Eficacia de una aleta

La eficacia de una aleta se define como: la razón entre el calor disipado por la superficie de la aleta y el calor que se disiparía si toda la superficie estuviese a la temperatura  $T_s$ .

En el caso presentado en el apartado anterior, la expresión utilizada para obtener la eficacia de la aleta será:

$$\text{Ecuación 6.13}$$

dónde:

$r$  es la resistencia de caída directa.

$V_{10}$  es la tensión umbral del semiconductor.

$P_{AV}$  es el calor suministrado al disipador.

$I_{AV}$  e  $I_{AVS}$  son los valores medio y eficaz de la intensidad que circula por el semiconductor.

El valor de estas dos intensidades depende del valor máximo de la intensidad, de su ángulo de conducción respecto al periodo total y de si su forma es rectangular o senoidal.

En el caso de trabajar con una célula Pelicer, debe añadirse la potencia de calor generada en la cara caliente que también deberá ser disipada con  $P_{AV}$ .

Una vez conocidas las pérdidas, se debe determinar el radiador necesario para que la temperatura de la unión no supere su valor máximo, y para ello se utiliza un circuito equivalente eléctrico del circuito térmico de evacuación del calor. El valor correspondiente a las pérdidas calculadas debe evacuarse al ambiente, y las resistencias térmicas que se oponen al paso del calor son:  $R_{sp}$  entre unión y capsula,  $R_{amb}$  entre capsula y radiador, y  $R_{amb}$  entre radiador y aire ambiente. La resistencia térmica total entre la unión y el aire ambiente  $R_{eq}$ , es la suma de las anteriores.

Con nomenclatura distinta (pero comprensible) vemos simbolizados estos términos en la siguiente figura:

Figura 36. Modelo eléctrico análogo



Gráfica extraída del libro Head Pipes y termoelectricidad, por Jane Mariam Casak.

La temperatura que alcanzará la unión para una temperatura ambiente y unas pérdidas directas medias, dadas es:

$$T_{unión} = T_{amb} + \frac{P_{directas}}{h_{efectiva}}$$

Ecuación 6.14

Generalmente, para el cálculo del radiador se dispone de los siguientes datos: temperatura máxima admisible de la unión  $T_{unión}$ , temperatura ambiente máxima estimable  $T_{amb}$ , pérdidas directas medias  $P_{directas}$ , resistencias térmicas unión - cápsula  $R_{u-c}$  y cápsula - radiador  $R_{c-r}$ .

Con estos datos es posible calcular la resistencia térmica del radiador necesaria  $R_{rad}$  (°C/W). Este parámetro indica cuánto se opone el radiador al paso del calor a través de él, por lo que interesa que su valor sea lo más bajo posible. La resistencia térmica total debe ser:

103

Hay que tener presente que el anodizado es un excelente aislante térmico y eléctrico, por lo que se debe eliminar de la superficie de contacto con el semiconductor.

Además la superficie de unión se debe proteger con la pasta SKS o SKG con dos finis: a nivel microscópico, el contacto entre las dos superficies se realiza solamente por unos pocos puntos de contacto, quedando huecos llenos de aire. La transmisión de calor a través de esta superficie será muy pobre. En cambio, si se rellenan los huecos con una pasta conductora del calor, se mejora la transmisión de éste un 30%. Al mismo tiempo, la circulación de una corriente eléctrica a través de una superficie de aluminio provoca una corrosión que degrada el contacto eléctrico. Para impedirlo, es necesario proteger las superficies de contacto con un agente de alta estabilidad eléctrica y térmica. En los montajes en que la fuerza de apriete dependa de un tornillo, éste debe volver a apretarse al cabo de unas horas, pues la pasta térmica puede fluir y la fuerza de contacto no sería correcta.

### Radiadores por convección natural

Se utilizan en aplicaciones de poca potencia. Es difícil generalizar, pero normalmente los radiadores de convección natural acostumbra a tener una resistencia térmica superior a los 0,5°C/W y a veces hasta exceden los 10°C/W.

Estos radiadores deben posicionarse de forma que la dimensión más grande de sus aletas, la longitud de las mismas, esté orientada verticalmente y sin obstruir la circulación libre del fluido refrigerante, normalmente el aire. Se tiene que procurar, además, que no haya otro foco caliente cerca del radiador de forma que pueda afectar la temperatura ambiente que rodea al disipador. Remarcamos nuevamente que es muy importante un

106

Ecuación 6.15

Del valor  $R_{tot}$  obtenido dependerá la necesidad de utilizar ventilación forzada o no. Si el valor no se puede conseguir, hay que elegir un semiconductor de mayor calibre y un radiador de menor resistencia térmica o refrigerado por agua.

En la siguiente figura se indican los valores de la resistencia térmica para un determinado radiador en función de sus longitudes (estos datos pertenecen a un *data sheet* de la empresa Semikon). Estos valores se han determinado en el caso de convección natural para superficies anodizadas en negro mate y montaje vertical sin ningún obstáculo que dificulte el movimiento ascendente del aire.

Figura 37. Radiador (según la longitud de las aletas en mm. el fabricante da los distintos valores de la resistencia térmica)



Gráfica extraída del libro Head Pipes y termoelectricidad, por Jane Mariam Casak.

En el caso de la convección forzada se indica la velocidad a la que el aire debe circular por el interior del radiador, siendo indiferente el acabado superficial de éste. La

104

buen acabado liso en negro anodizado sobre aluminio; esto provoca un incremento del 10% en su eficiencia.

Es conveniente dimensionar el radiador de forma que sea tan grande como podamos. Tengamos en cuenta que para reducir la resistencia térmica del radiador a la mitad es necesario aumentar cuatro veces su volumen.

Figura 38. Sistema termoelectrónico con 4 radiadores por convección natural



Gráfica extraída del libro Head Pipes y termoelectricidad, por Jane Mariam Casak.

Otra versión de radiadores por convección natural es la que utiliza una parte estructural o el chasis en el que van montados los TEC para extraer el calor. Montando el TEC sobre el chasis conseguimos que este actúe como radiador, pasando el calor al ambiente. Es difícil evaluar la eficacia de estos "radiadores" sin recorrer a la experimentación. Además, debe tenerse en cuenta si hay otro elemento en contacto con el chasis que esporádicamente pueda aportar también calor.

### Cálculos para la elección del radiador

En primer lugar, debe determinarse el valor de la resistencia térmica y a continuación se puede seguir cualquiera de los dos caminos:

- Modelos estándar: conocido el valor de la resistencia térmica, buscaremos en la tabla correspondiente a cada modelo aquel que posea un valor igual o menor, y cuyo mecanizado y dimensiones se adapte a nuestras necesidades.

107

superficie de contacto entre radiador y el semiconductor debe ser plana, poco rugosa y limpia.

El anodizado debe eliminarse pues, es muy buen aislante eléctrico. Es necesario mejorar el contacto térmico mediante el uso de una muy fina capa de pasta de silicona como la SKS. Las fuerzas de apriete indicadas por los fabricantes de los semiconductores deben aplicarse con exactitud. Los radiadores se pueden comprar en cualquier longitud y con el mecanizado necesario según la aplicación.

Dentro de un equipo de potencia, el radiador no realiza solamente funciones térmicas sino que también desempeña un importante papel en la estructura mecánica y en el conexionado eléctrico. Para llevar a cabo estas tres funciones con eficacia, es necesario un conjunto de accesorios.

En el montaje de los semiconductores de potencia sobre los radiadores, se debe poner especial cuidado tanto en el acabado de las superficies de contacto como y en la fuerza de apriete, pues de estos dos aspectos depende el conseguir la resistencia térmica cápsula - radiador indicada por el fabricante del semiconductor. La superficie de montaje en el radiador debe ser plana y poco rugosa, las tolerancias mecánicas recomendadas son de menos de 20µm (milésimas de milímetro) para la planitud y de 10µm. para la rugosidad. Una superficie de aluminio recién pulida desarrolla una capa finísima de óxido en pocas horas.

Como el óxido de aluminio es un buen aislante térmico y eléctrico, es imprescindible limpiar y desoxidar, en el mismo momento de montar los semiconductores, las superficies de contacto.

105

- Modelos especiales: conocido el valor de la resistencia térmica,

1.- En el gráfico correspondiente al modelo elegido, hallaremos para cada valor de la resistencia térmica una longitud de perfil necesaria.

2.- Si el disipador objeto de cálculo debe albergar más de un foco catrífico, se hallará la longitud de cada uno de ellos de acuerdo con el gráfico, sumándose luego todos los valores hallados. Es aconsejable en estos casos incrementar en un 10% el valor resultante.

3.- Si el acabado del disipador se desea anodizado negro, puede reducirse la longitud del radiador hasta en un 20%, según la posición del montaje.

Figura 39. Coeficiente de posición



Tomado de la página WWW.mankis.es año 2000.

En todos los casos debemos aplicar el coeficiente de corrección según la posición del montaje. Para ello, debe dividirse el valor teórico de la resistencia térmica por el coeficiente de posición que se indica en la anterior figura.

108

### Radiadores por convección forzada

Estos son, de momento, los radiadores más utilizados en sistemas termoelectrónicos. Su eficacia es mucho mayor que la obtenida por convección natural, ya que llegan a resistencias térmicas de 0,02 a 0,5°C/W.

Muchos radiadores por convección forzada que encontramos en el mercado ya están fabricados para que se puedan unir a un ventilador capaz de crear el flujo necesario para la refrigeración de las aletas. Este flujo debe estar dirigido de forma que coincida con la longitud de las aletas, así se consigue máxima eficacia.

### Figura 40. Sistema termoelectrónico con radiador por convección forzada



Gráfica extraída de libro Head Pipes y termoelectricidad, por Jane Marión Casals.

### Ventiladores

Se dispone de ventiladores axiales diseñados especialmente para su acoplamiento a los perfiles de los radiadores. Los modelos con motor de continua sin escobillas *brushless*, presentan un rendimiento mucho mejor que los equipados con motores de alterna y de continua con escobillas, reduciéndose además las interferencias electromagnéticas y el nivel de ruido acústico producido.

El factor  $F_v$  se obtiene del gráfico siguiente en el que se relaciona dicho factor con la velocidad del flujo de aire circulante.



Gráfica extraída de libro Head Pipes y termoelectricidad, por Jane Marión Casals.

El factor  $F_r$  se indica en las características de cada modelo apropiado para convección forzada. Para los modelos que no indiquen el mencionado factor de forma, puede emplearse el gráfico mostrado en la figura 42.

Este sólo es apto para los casos en que el aire circula de forma longitudinal a las aletas del radiador, que es lo más normal y óptimo.

Calcularemos el valor  $S_v$  que corresponde a la sección abarcada por las aletas; dividiremos este valor por el de la superficie total abarcada por el flujo de aire  $S_f$ :

El resultado  $S_v / S_f$  corresponde a los valores del gráfico, con un máximo de 1 y un mínimo de 0,5, valor por debajo del cual ya no es rentable el empleo de convección forzada, debido al bajo rendimiento obtenido.

Los ventiladores axiales van equipados con un motor con rotor externo y aislamiento B. Este tipo de rotor externo gira alrededor del estator interno. El resultado es un diseño compacto con unas excelentes características de caudal.

A continuación se dan unas características que cumplen la mayoría de los ventiladores que se encuentran en el mercado.

La carcasa es de fundición de aluminio y la superficie está acabada con pintura negra aplicada electrostáticamente, para protección de las condiciones ambientales. Las aspas son de plástico de color negro.

Las características de estos ventiladores son tales que el bobinado no se quema, incluso trabajando en condiciones muy adversas. Todos los materiales utilizados para su fabricación son incombustibles.

Los ventiladores se pueden comprar con los rodamientos a bolas o bien sinterizados. Este último es de bronce sinterizado, impregnado de aceite de alta calidad. El bombeo hidrodinámico y la presión del aire obligan al aceite al desplazamiento a través del rodamiento para conseguir una película constante de lubricante. Hay que evitar desprender la etiqueta con la referencia del ventilador, ya que al mismo tiempo hace de elemento de fijación del tapón de rellamado de aceite. Si se saca ésta, el tapón no queda hermético y puede ir perdiendo el aceite, con el consecuente enlameamiento del rotor.

- Temperatura de trabajo: -10°C/+72°C cojinete sinterizado
- 20°C/+80°C cojinete a bolas
- Temperatura de almacenamiento: 40°C/+75°C

### Figura 42. Curva del factor de forma



Gráfica extraída de libro Head Pipes y termoelectricidad, por Jane Marión Casals.

- Segundo planteamiento, dada una resistencia térmica en condiciones de convección forzada, calcular qué valor de resistencia térmica tendría el mismo disipador en convección natural.



Ecuación 6.17

\*Se usan los mismos datos que en el planteo anterior.

### Aclaraciones

Estos datos solamente son válidos cuando la circulación del aire se realiza en igual dirección que el sentido del alantado.

- Los perfiles en los que no se indica factor de forma, se consideran poco aptos para su montaje en convección forzada.

- Cuando la circulación de aire es en sentido distinto al indicado, o se desea emplear algún perfil de los que no indican su factor de forma, los fabricantes recomiendan consultar su departamento técnico.

### • Tensiones de trabajo:

- En tensiones alemanas: para 115V: 85/125V, para 220V: 185/245V
- En tensiones continuas, tensiones indicadas  $\pm$  5%.

Se pueden montar por las dos caras con 4 balafros roscados. Se recomiendan tornillos M4.

La vida de los ventiladores depende de las condiciones de funcionamiento, como temperatura ambiente, ciclos de funcionamiento, vibraciones, posición de montaje, etc. La vida típica a 40°C de temperatura ambiente está entre 20.000 y 40.000 horas.

### Cálculo para la elección del radiador

Determinaremos la resistencia térmica necesaria de acuerdo con los cálculos vistos en la ecuación 6.15. A continuación se pueden seguir dos caminos:

- Primer planteamiento, dado un valor de resistencia térmica de un disipador conocido, se debe hallar la nueva resistencia térmica que resultará de aplicar a dicho disipador un flujo de aire a una velocidad determinada.



Ecuación 6.16

donde:

- $F_v$  es el factor de velocidad
- $F_r$  es el factor de forma

### Radiadores refrigerados por líquido

Estos son sin duda los radiadores que consiguen una mayor eficacia por unidad de volumen. Con algunas excepciones, consiguen resistencias térmicas de 0,01°C/W y 0,1°C/W.

Los radiadores con líquido están formados por unos conductos internos por los que puede fluir el agua u otro fluido refrigerante que se ocupará de absorber el calor que salga del TEC y llevarlo a otra parte del sistema para que pueda ser intercambiado con el ambiente.

La desventaja de estos radiadores lo constituye principalmente su coste y el hecho de necesitar casi siempre la ayuda de algún mecanismo para hacer circular el fluido, por ejemplo una pequeña bomba de agua.

## 7. CÉLULAS TERMOELECTRICAS Y SU IMPACTO EN EL ORGANISMO HUMANO Y EL MEDIO AMBIENTE

### 7.1 Beneficios de las células termoelectricas en comparación con los CFC y los HCFC

elimina la necesidad de disponer de otras unidades de apoyo en refrigeración, que si son necesarias, por ejemplo, en los sistemas con compresor. Los sistemas termoelectrónicos no necesitan válvulas proporcionales ni mecanismos que trabajen en cascada.

Los sistemas modulares se pueden monitorizar localmente o desde un lugar remoto, utilizando simplemente medidores de resistencias. A un módulo dañado se le puede aplicar un *by-pass* eléctrico, o bien hidráulico, dependiendo de la naturaleza de la avería, sin que ello vaya en detrimento de su capacidad.

Es necesario resaltar los sistemas termoelectrónicos por su gran fiabilidad, versatilidad, inercia y especialmente por su capacidad de ser regulados térmicamente con gran precisión (de hasta 0,001°C dependiendo de las aplicaciones).

Los sistemas termoelectrónicos pueden utilizar fuentes de alimentación DC compatibles con cualquier unidad disponible de energía. Se pueden utilizar varias series puestas en paralelo, con ello podemos aprovechar la instalación de un gran número de módulos.

#### 7.2 Los sistemas termoelectrónicos ofrecen beneficios económicos.

Estos sistemas termoelectrónicos ofrecen ventajas económicas a largo plazo si se comparan con los sistemas convencionales:

- Los costes de instalación son un 25% más bajos.
- Bajo las condiciones de operatividad en un circuito electrónico, requieren baja potencia, lo que aumenta significativamente el ahorro de energía.
- La producción masiva automatizada reducirá los costes del sistema termoelectrónico (aislantes, dispositivos termoelectrónicos, termosifones...) frente a un sistema absolutamente mecánico.

116

cámaras e incluso vehículos móviles, con la gran ventaja de poderlas refrigerar, ventilar y calentar con el mismo sistema.

El principal problema es el desconocimiento, por parte de las empresas, de su existencia y eficacia, lo cual es lógico si tenemos en cuenta que aun hay pocos fabricantes.

De todas formas, en estos momentos se puede encontrar en el mercado algunos módulos de refrigeración para CPU y diversas aplicaciones con estas tecnologías. Cabe destacar el estudio que están haciendo las empresas Cideite Ingenieros, S.L. y Semikron, S.A. en nuevas aplicaciones.

Estas son las empresas más importantes en la fabricación de modelos y placas termoelectrónicas:

Marlow  
Mélcor  
kryotherm  
Tellurex  
Nord  
TE Technology

También hay empresas dedicadas a la producción de sistemas termoelectrónicos de generación eléctrica, entre las cuales destacan:

HE-Z (USA)  
Teledyne Brown Engineering (USA)  
King Abdulaziz (Arabia Saudita)  
Kvant (Rusia)

119

Un dispositivo termoelectrónico conocido como célula termoelectrónica, "TEC", por sus siglas en inglés *Thermoelectric cooler*, es una bomba de calor que no necesita ningún tipo de refrigerante o compuesto químico para variar la temperatura de un ambiente común, contrariamente con lo que sucede en una bomba de calor mecánica, la misma que en años anteriores utilizaba como refrigerante el diclorodifluorometano o refrigerante 12 el refrigerante 11 y el refrigerante 22. Los tres son compuestos clorofluorocarbonados (CFC) sintéticos que eran los principales compuestos empleados en sistemas de enfriamiento y aislamiento de los refrigeradores domésticos, pero se ha descubierto que los CFC suponen una grave amenaza para el medio ambiente del planeta porque contribuyen a la destrucción de la capa de ozono.

Otros refrigerantes mencionados con anterioridad, los hidroclofluorocarbonos (HCFC) y el metilbromuro no dañan la capa de ozono pero producen gases de efecto de invernadero y por ende el sobrecalentamiento global de el planeta.

Hay otros refrigerantes utilizados para enfriar grandes cantidades de líquido o ambientes como lo son el dióxido de carbono o bien el amoníaco que es utilizado para enfriar bebidas gaseosas por el método de absorción, visto con anterioridad en este trabajo. El uso de dichos refrigerantes requiere un cuidado extremo, pues un derrame al medio ambiente puede no sólo ser perjudicial para éste sino además mortal.

En la búsqueda de nuevas alternativas de refrigeración, se consideran la termoelectricidad como la energía más limpia y prometedora en este sector.

Los sistemas termoelectrónicos son compactos, su diseño nos permite disponer de un sistema de reserva de energía, y pueden suministrar hasta un 180% de capacidad de refrigeración con tan sólo incrementar la potencia de entrada. Este excepcional diseño

115

transcurrido entre pequeñas averías no fue inferior a 100.000 horas. Este tipo de fiabilidad jamás fue igualada por ningún sistema de refrigeración con compresor.

Las aplicaciones actuales se limitan a sectores cuyo problema de refrigeración ha de ser puntual, localizado, o bien de poco volumen. Uno de estos sectores y que cada vez tiene mayor demanda es el sector del «gran consumo», así, podemos observar en el mercado nacional las convencionales neveras portátiles (con radiador convencional) que se pueden conectar al vehículo y cuyo objetivo principal es el de conservación.

Se han podido observar grandes críticas sobre esta aplicación, debido al bajo rendimiento y poco frío que producen, la razón es obvia. Fundamentalmente, es un problema de precio de mercado, por ello los aislantes no son los más adecuados y la potencia frigorífica es escasa, esto trae como consecuencia un descuido y una falta de confianza en empresas que ven con grandes expectativas esta forma de hacer frío.

Otro de los sectores que van adquiriendo relevancia dentro de las aplicaciones es el de la electromedicina, especialmente en la estabilización de la temperatura de los fotómetros, refrigeración cutánea, o bien para medir la sensibilidad de la piel.

Aplicaciones industriales como hornos bacteriológicos, cámaras refrigeradas, incubadoras, baños estabilizados, refrigeración de tubos de ensayo, planchas frías, refrigeración de armarios eléctricos, expositor para tapes, expositor para quesos, y un largo etcétera, son sectores en los cuales las placas termoelectrónicas tienen un gran porvenir.

Actualmente, ya están fabricando diversos aparatos industriales con esta tecnología. Así, tenemos a la empresa J. P. Seletta, S.A., pionera en este sector y que fabricó el primer horno bacteriológico refrigerado con el uso de la termoelectricidad; la empresa Beretza, S. L. de Navarra, está fabricando sistemas para refrigerar armarios, habitáculos,

- Al ser una unidad compacta, ofrece la posibilidad de un buen diseño, y al ser modular un ahorro de costes, peso y espacio.

- Si hacemos un análisis de mantenimiento, se observa que bajo un ciclo de vida, el coste de mantenimiento de un sistema termoelectrónico es mucho más bajo que el de un sistema mecánico.

El sector de las aplicaciones termoelectrónicas es muy diverso y muy diverso, surgiendo como tal a comienzos de los años 50 en Estados Unidos, con grandes expectativas de futuro. Incluso se llegó a pensar que sustituiría a los tradicionales sistemas de compresor en todas sus fases.

A modo de ejemplo, la Marina de Estados Unidos ha reconocido las grandes ventajas de los sistemas de refrigeración termoelectrónicos en los cuadros de maniobras de los submarinos y en los barcos de superficie, por ello ha subvencionado su desarrollo.

La tecnología se demostró inicialmente instalándola en el Destructor USS Douglas Fox, en 1965, para refrigerar los sistemas de radar.

El éxito de la operación motivó a la Marina a instalar 14 unidades más en el mismo destructor para su refrigeración. Durante 1966, se instaló un sistema de aire acondicionado, calefacción y deshumidificación en el barco de submergencia Trieste II.

La unidad de aire termoelectrónica más completa se instaló en un submarino experimental, el USS Dolphin en 1972. Dicha unidad ha demostrado ser altamente fiable, ha suministrado aire acondicionado constantemente desde aquel entonces hasta nuestros días. Los módulos termoelectrónicos de refrigeración han trabajado con éxito durante más de 2 millones de horas, incluyendo tiempos de maniobra del barco. El tiempo

117

Global Thermoelectric (Canadá)  
Biopos (Rusia)

Las empresas dedicadas a la fabricación de equipos termoelectrónicos son:

CIDEITE Ingenieros  
TE Technology  
Monokrom SI  
TE Beretza SL

Las aplicaciones más marcadas para el uso de dispositivos termoelectrónicos son:

Refrigeración en general:

Industriales  
Electromedicina  
Espaciales (NTE)  
Equipos científicos de laboratorio

Se ejemplifica, a continuación, aplicaciones de diseño integrado para termoelectricidad:

Espectrofotómetros  
Expositores para chocolate  
Tratamientos cutáneos  
Equipos de laboratorio  
Aparatos de estética  
Refrigeración de trenes  
Convertidores de potencia  
Aplicaciones espaciales  
Equipos para hospitales

118

120

Tratamientos clínicos con láser  
Optoelectrónica láser  
Radiómetros  
Refrigeración en el Automóvil

Los sistemas termoelectrónicos de refrigeración son:

Aire - Aire  
Aire - Agua  
Agua - Aire  
Agua - Agua

Retomando el tema de los beneficios que representa la aplicación de las células termoelectrónicas al organismo humano, no sólo se presentan las posibilidades de evitar un derrame de refrigerante en un sistema convencional, sino también la aplicación de termoelectricidad en la medicina moderna bajo el nombre de termoterapia.

### 7.3 Termoterapia

El calor ha sido utilizado desde la antigüedad como un medio de analgesia y relajación. En fisioterapia, la termoterapia es utilizada además como un medio para aumentar el flujo sanguíneo regional, y sobre articulaciones rígidas o músculos contracturados previamente a la kinesiterapia.

Tratamientos con sistemas por conducción:

- Manita termoelectrónica
- Compresas
- *Hotpacks*

121

### Las contraindicaciones de la termoterapia superficial en las cervicales agudas

- Las contraindicaciones de este tratamiento son muy limitadas, reduciéndose a patologías sistémicas como alteración de la sensibilidad, coagulopatías y tumores malignos.

### Otros agentes físicos

En la fase aguda, generalmente no se tienen arcos de movilidad libre, para intentar la manipulación vertebral. La tracción puede que sea mal tolerada, debiéndose, en todo caso, ensayar previamente la tracción manual, suave y progresiva por el fisioterapeuta. El masaje muscular relajante puede aliviar o irritar. En la fase Hiperálgica es mejor no recurrir a estos procedimientos, ya que son más propios de una fase crónica.

#### Equipos termoelectrónicos para aplicaciones en termoterapia

- Todos los equipos termoelectrónicos para aplicaciones de termoterapia pueden modificarse y adaptarse a las aplicaciones de cada usuario, los rangos de temperatura mediante este sistema son desde: +150 °C hasta -80 °C.

La gran ventaja que ofrece este sistema es la de poder trabajar a baja tensión e, incluso, en equipos transportables y que puedan trabajar con la batería de un vehículo o una unidad móvil (ambulancia).

### 7.4 Células termoelectrónicas y su proyección hacia el futuro

- Bolsas de agua
- Baños de parafina

Tratamientos con sistemas por convección:

- Hidroterapia
- Aire húmedo

• Aire seco

Tratamientos con sistemas por radiación:

- Infrarrojos
- Onda corta
- Microondas
- Ultrasonidos

Indicaciones del tratamiento ortésico en la columna cervical:

- Cervicalgias y cervicobraquialgias mecánicas, agudas y crónicas, reagudizadas por el movimiento

- Secundarias (hernia discal, artrosis,...)

- Cervicalgias en el curso de enfermedades inflamatorias del aparato locomotor

- Artritis reumatoide, espondilitis anquilosante

- Postoperatorios

- Traumatismos

- Esguínces cervicales

122

Como ya se ha visto en apartados anteriores, los sistemas de absorción funcionan con gas, petróleo, electricidad o cualquier tipo de energía capaz de proporcionar calor, pudiéndose encontrar sistemas que acepten los tres métodos de funcionamiento. Am así, son más robustos los que utilizan gas, ya que los de queroseno presentan más problemas de funcionamiento.

También se ha de tener en cuenta la dificultad que presenta el aprovisionamiento de botellas de gas (prohibido por vía aérea) y con suministros irregulares o inexistentes en algunas zonas. El nivel de consumo varía en función de la temperatura exterior, pero aproximadamente, y para un refrigerador de gas pueden rondar los 13 Kg de gas cada 20 ó 30 días.

En cambio, para un refrigerador de queroseno ronda 1 litro de petróleo por cada litro a una temperatura exterior de 43 °C. Los inconvenientes son el poco rendimiento, la producción lenta de frío, indispensables la posición horizontal y la inmovilidad, así como llevar un buen mantenimiento.

El sistema de compresión es el que comúnmente se utiliza para las neveras, congeladores y cámaras frigoríficas en los países industrializados. Estos equipos son adecuados para zonas donde el suministro eléctrico sea estable y esté garantizado. Las ventajas que ofrecen son un elevado rendimiento, una producción rápida de frío y pueden utilizarse en vehículos móviles si no se invierten nunca. Los inconvenientes son que sólo funcionan con electricidad; disponen de una mecánica compleja, por lo que complica las reparaciones; soportan mal las variaciones de tensión eléctrica, y siguen usando gases contaminantes.

En los últimos veinte años ha habido una preocupación por los problemas que genera la expulsión de ciertos gases, como los utilizados en refrigeración por compresor. El

126

- Esguínces, fracturas y/o luxaciones sobre todo de atlas y axis
- Inyecciones: discitis, espondilodiscitis, osteomielitis
- Neoplasias: primitivas metastásicas

### Efectos biofísicos de la termoterapia

- Dependén del gradiente de temperatura, de la rapidez de transferencia de energía del volumen de tejido expuesto

- Efectos sobre el metabolismo

- Efectos vasculares, diferentes según el tejido interesado. Básicamente vasodilatación local y regional

- Efectos neuromusculares: Analgesia y miorelajación

- Efectos sobre el tejido, como un aumento de las propiedades visco elásticas del mismo

### Técnicas de aplicación de la termoterapia superficial en las cervicales agudas

En las cervicalgias agudas se utilizan los medios de calentamiento por conducción y radiación, en especial parches termoelectrónicos y rayos infrarrojos. Con estas técnicas de termoterapia superficial, la transferencia de calor debe graduarse según la tolerancia del paciente, y deben evitarse las quemaduras cutáneas. El efecto que se busca es el de obtener analgesia, disminución del espasmo muscular de defensa, rompiendo el círculo vicioso dolor-contracción-dolor.

123

medio ambiente se ha visto altamente deteriorado en los países industrializados, por lo que se han ido variando los sistemas y los gases utilizados.

Esta necesidad de cambiar los sistemas de refrigeración y el repentino crecimiento de la industria de los microprocesadores de alta velocidad (que generan gran cantidad de calor y por lo tanto se requiere una refrigeración instantánea y puntual), ha provocado que se estudiaran en profundidad nuevos sistemas de refrigeración, como la refrigeración termoelectrónica.

Según los estudios realizados por diferentes empresas y autores, la tendencia que existe en el aumento de la eficiencia o rendimiento de las células termoelectrónicas es creciente; así, en unos 5 ó 7 años se podría conseguir unos rendimientos altamente competitivos.

De la misma manera, el precio de producción, y por lo tanto el de venta de los ETE, baja considerablemente año tras año, hecho que demuestra cómo la tecnología no sólo es más asequible sino que es más utilizada día a día.

A continuación, se comparan los consumos de diferentes modelos comerciales de sistemas de refrigeración por compresión y un prototipo de refrigerador termoelectrónico (con radiadores), de capacidad similar y bajo una temperatura ambiente de 32°C.

126

## Tabla X Refrigeración por compresor vs. refrigeración termoelectrica



Tomado del libro Heat pipes y termoelectricidad, por Maïmea Casals

El sistema termoelectrico consume una cantidad mayor de energía que los actuales sistemas de compresión. Esto puede suponer una gran desventaja y no hacer extensivo su uso, olvidando las grandes ventajas ya comentadas con anterioridad, que los sistemas de refrigeración termoelectricos presentan:

Respecto al medio ambiente y facilidad en el reciclaje, elevado tiempo de vida, mínimo mantenimiento y, por lo tanto, menores costes asociados a estas características.

Figura 43. Fracción energética de los sistemas por compresor vs. los de refrigeración termoelectrica



Tomado del libro Heat pipes y termoelectricidad, por Maïmea Casals

Aun así, cabe clar que si la evolución de los sistemas termoelectricos continua avanzando como hasta ahora, tanto a nivel de rendimiento como de reducción de precio, este sistema será altamente competitivo en pocos años, por lo que es un dato a considerar,

Este trabajo, modestamente, lo que pretende es darle un lugar especial a los fenomenos termoelectricos, haciendo énfasis en la limpieza que implica el uso de dichos componentes y las posibilidades limitadas que se abren a la inventiva, al ser de tamaño reducido y poder colocarse en cualquier posición los componentes termoelectricos descriptos.

## 7.5 Células termoelectricas en el campo de la inventiva en Guatemala

Guatemala es un país fuertemente limitado en el campo de la inventiva y estudios de nivel científico, por el entorno socioeconómico y el bajo presupuesto al campo de investigación docente; es por eso que la termoelectricidad ofrece una gran ventaja en lo que a la realización de proyectos se refiere, esto es, que gracias al bajo costo que representa una pequeña bomba de calor llamada célula Peltier.

Se pueden crear diseños que puedan dar soluciones exactas por medio de un presupuesto relativamente bajo, por ejemplo en aire acondicionado, al evitar la humedad en el medio ambiente proporciona una alternativa para pacientes asmáticos.

La tecnología termoelectrica abre infinitud de posibilidades en lo que a diseño se refiere, por ejemplo, se puede diseñar ropa climatizada que mantenga la temperatura corporal sin importar el clima externo, una chaqueta o zapatos climatizados, pueden funcionar con pilas eléctricas comunes y corrientes.

8. La tecnología termoelectrica no es dañina para el organismo humano, ni al medio ambiente, a la hora de dejar de funcionar los desechos de los módulos termoelectricos son renovables.

9. Las células termoelectricas requieren poco mantenimiento, en referencia a otros tipos de bombas de calor.

## RECOMENDACIONES

1. Al momento de emplear tecnología termoelectrica se debe conocer perfectamente la capacidad de refrigeración o calefacción a emplear, pues dicha tecnología tiene sus restricciones.
2. En el entorno a utilizar una célula termoelectrica se debe tener una fuente de poder estabilizada que suministre corriente continua para que dicho componente funcione.
3. En la tecnología termoelectrica, es muy importante el tipo de radiador a emplear, se tienen que hacer cálculos exactos en cuanto a disipador de calor se refiere.
4. Una célula termoelectrica no puede sumergirse en ningún líquido cuando está en funcionamiento, para evitar un corto circuito.
5. En las aplicaciones en que el punto de rocío pueda producir condensación de agua, se debe proveer a las células termoelectricas de algún tipo de protección de sellado para evitar un corto circuito y efectos electrolíticos en el sistema.
6. Por ningún motivo se debe perforar una célula termoelectrica, pues se puede llegar a estropear dicho componente, haciéndolo inservible.
7. Para utilizar termoelectricidad en refrigeración a gran escala, se debe estudiar métodos combinados, tal y como el uso de termosifones o *heat pipes*.

8. Las células Peltier reciben varios nombres, dependiendo de la casa que los produce y el idioma, por lo tanto, no debe de extrañar la terminología utilizada en este trabajo, pues se ha hecho con el propósito de dar a conocer la terminología más usada en el mercado, dichos nombres son:

- TEC = por sus siglas en inglés, *Thermoelectric cooler*.
- ETE = elemento termoelectrónico.
- Células termoelectrónicas.
- Módulos termoelectrónicos.
- Placas termoelectrónicas.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. G. Gromov, **Technology & Services**. (Editorial Technology USA 1998), pp. 2-15
2. J. G. Yáñ y D. Astrain, "Estudio de la disipación de calor y su representación en la eficiencia de los sistemas de refrigeración termoelectrónica", **REVISTA Energía** (n.o.6), pp. 87-89, Marzo 2000.
2. Raymond Chang, **Química**. (2ª. edición México: Editorial Mc Graw Hill 1991), pp. 10-20.
3. Robert Boylestad, **Electrónica, teoría de circuitos**, (4ª edición México: Editorial Prentice-Hall Hispanoamericana, S. A. México 1987) pp. 1-10.
4. Marióna Casals Junc, **Head pipes y termoelectricidad**. (España: Editorial CIDETE Ingenieros 2000), pp. 13-16.
5. Anselmo Chavé, "Introducción a la termoelectricidad" [www.arrakls.es](http://www.arrakls.es), publicación española de CIDETE Ingenieros 2000.
6. Departamento de electrónica automática e informática industrial, "Práctica de servo sistemas número 6", **Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Madrid**, España: 4-10, 2000.
7. Marióna Casals Junc, *Ibid.*, pp. 102-120.
8. *Ibid.*, pp. 222-225.
9. Mr. German Noriega, "Termoterapia" [www.manoftherm.org](http://www.manoftherm.org), publicación española de CIDETE Ingenieros 1999.
10. Enciclopedia Microsoft "Encarta 2001", **Microsoft Corporation** 1993-2001.

#### BIBLIOGRAFÍA

1. De Groot, S. R. Termodinámica de los procesos reversibles (s.l.), Ed. Alambra, 1968.
2. Dominguez Pinales, M. J. M. y P. Gutiérrez, "Aportaciones al desarrollo del efecto Peltier en el campo del frío", *Revista Refrigeración Frío*, España, 1991.
3. Fedorov M. I. et al. (1995) Prospects of Various thermoelectric uses in thermoelectric generators. XIV ICT, St Peterburg: Ed M.V. Veremkov. Pp: 215-216, 1995.
4. Isachenko, Osipova y Sukomed. Transmisión de calor. España: Marcombo, Boxerman editores, 1979.
5. J. Aguilar: Curso de termodinámica. Arlington, Tx. USA: Ed. K. Rao, (1989).
6. J. Dauvergne J. Le confort thermique de véhicules électriques. Paris: (s.e.), p. 53-56, 1993.
7. Millman, Jacob, Halkias, Crisao, C. Electrónica Integrada. 5ª. España: Editorial Hispanoamericana S.A., 1983.
8. Noriega F.G. Air Conditioning for Automotom by Thermoelectric. Rowe, D. M. y C. M. Bandini. Modern thermoelectrics. (s.l.), Ed. Holt. Technology, 1984.
9. Systems. Rev. Termoelectricidad Vol 2, número 1 (s.l.) 7:15 (1995), Villanubia M. "La refrigeración termoelectrónica", *Revista energía* (España), (s.n.); 65-72.
9. [www.kryotherm.sphru](http://www.kryotherm.sphru)
10. [www.marlow.com](http://www.marlow.com)
12. [www.melcor.com](http://www.melcor.com)
13. [www.supercool.se](http://www.supercool.se)
14. [www.telurex.com](http://www.telurex.com)
15. [www.teitsh.com](http://www.teitsh.com)
16. [www.thermoelectric.com](http://www.thermoelectric.com)