

FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA TERMOELÉCTRICIDAD

JOHN ALEXANDER GONZÁLEZ ZAMORANO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN, COLOMBIA
2015

FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA TERMOELÉCTRICIDAD

JOHN ALEXANDER GONZÁLEZ ZAMORANO

Modalidad seminario

Director

MSc Jorge Washington Coronel Garcia

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN, COLOMBIA
2015

Director _____
MSc. Jorge Washington Coronel García

Jurado _____
PhD. Carlos Alberto Rincón López

Jurado _____
PhD. Gilberto María Bolaños Pantoja

CONTENIDO

	Pág.
Capítulo 1. Consumo de Energía y Principales Fuentes	
1.1 Introducción	1
1.2 Consumo de Energía en la Actualidad	2
1.3 Principales Fuentes de Energía en la actualidad	6
Capítulo 2. Termoelectricidad	
2.1 Introducción	14
2.2 Relaciones entre los coeficientes termoeléctricos	16
2.3 Efectos en un campo magnético	18
Capítulo 3. Teoría de la refrigeración termoeléctrica	
Y generación de potencia	
3.1 Efectos de transporte	22
3.2 Refrigeradores termoeléctricos y bombas de calor	22
3.3 Dispositivos con etapas múltiples	29
3.4 Aplicaciones de los efectos de magnetotérmicos	32
Capítulo 4. Módulos termoeléctricos y sus aplicaciones	
4.1 El concepto Modular	39
4.2 Problemas de transferencia de calor	43
4.3 Resistencias de contacto	47
4.4 Aplicaciones del efecto Peltier	49
4.5 Efectos Transitorios de enfriamiento	51
4.6 Dispositivos Seebeck	55
Capítulo 5. Dispositivos transversales	
5.1 Características de refrigeradores transversales y generadores	58
5.2 Termoelementos sintéticos transversales	59
5.3 Materiales para Termoelementos transversales	63
5.4 Configuraciones alternativas	69

CONTENIDO

	Pág.
Conclusiones	71
Referencias	73

Capítulo 1.

Consumo de Energía y Principales Fuentes de Energía en la Actualidad

1.1 Introducción

El creciente consumo de energía en el mundo y la preocupación por los efectos dañinos que generan los gases emitidos por la utilización de combustibles fósiles en el medio ambiente, obligan a desarrollar nuevas tecnologías para la producción de mayores cantidades de energía con el menor impacto ambiental posible. En este sentido, la termoelectricidad propone una nueva manera de utilización de la energía sin generar ningún impacto negativo al desarrollo sostenible del planeta.

Los combustibles fósiles, principales fuentes energéticas en la actualidad, presentan graves problemas de contaminación ambiental debido a la producción excesiva de CO₂ y otros gases. Las actuales fuentes de energía renovable, aunque satisfagan las necesidades energéticas y no presenten emisión de gases de efecto invernadero, generan relativamente poca potencia por lo que requieren grandes extensiones de terreno destinadas a la producción energética, como es el caso de los gigantescos molinos de viento y los paneles solares.

Otras fuentes renovables como las hidroeléctricas, aunque generan grandes cantidades de potencia, requieren la construcción de gigantescos reservorios lo cual implica la inundación de grandes cantidades de terreno, y como se observa actualmente en nuestro país, este tipo de construcciones además de afectar negativamente el ecosistema, atenta incluso con la estructura de las comunidades que se ven obligadas a enfrentar el destierro y el desplazamiento forzoso.

La termoelectricidad propone un mayor aprovechamiento de la energía que de otro modo se desperdicia en un proceso a partir de conversiones térmicas a eléctricas, su mayor aplicación se logra en la construcción; bombas de calor, sistemas de refrigeración tales como: células Peltier y componentes de estado sólido.

Actualmente se trabaja para encontrar materiales que permitan un coeficiente de mérito Z que superen los valores de 2- 2.5 para competir satisfactoriamente con mecanismos que trabajan con refrigeración y calefacción bajo otros principios físicos que resultan inadecuados a la hora de pensar en el sostenimiento ambiental y la economía.

1.2 Consumo de Energía en la Actualidad.

La energía es indispensable para las personas y la sociedad en aspectos como: producción de alimentos, transporte, calentamiento, iluminación, funcionamiento de fábricas e industrias y telecomunicaciones entre otros. En la actualidad, tras el continuo aumento de la población mundial y el consumismo excesivo e irracional, la demanda en el consumo de energía aumentará.

Por tal razón, el abastecimiento de energía mundial enfrenta dificultades y el aumento de producción e industrialización de los países en desarrollo aumentan la necesidad de explorar otros modos de producción de energía. La proyección de consumo energético estima que para el año 2100 equivaldrá al doble del gasto actual.

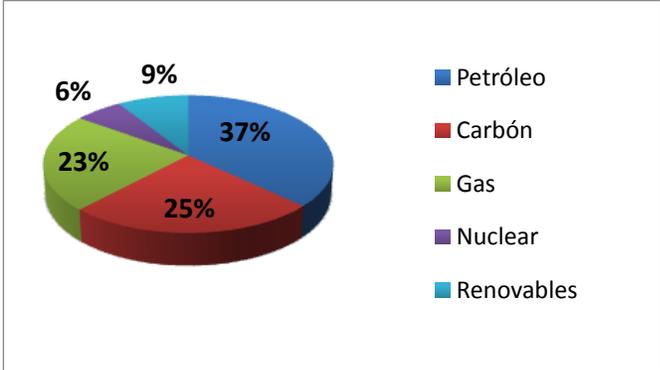


Gráfica 1.1 Consumo energético y población mundial.

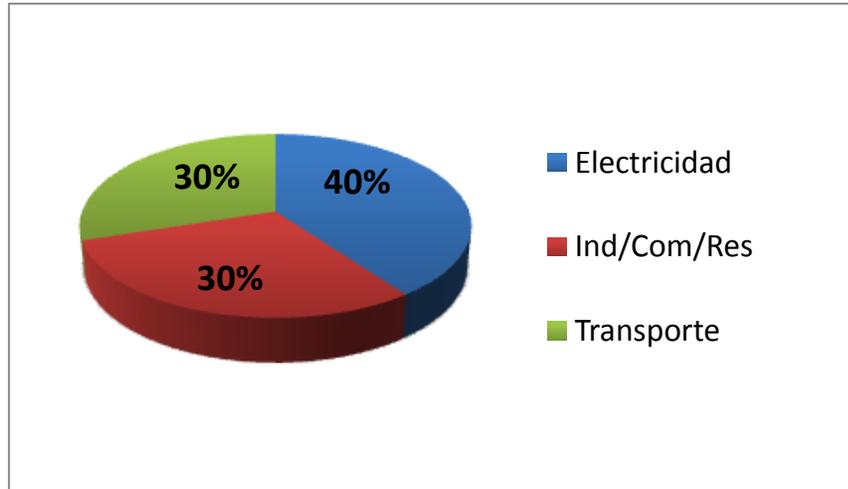
La gráfica 1.1, muestra los porcentajes de consumo de energía y de la población en el mundo. Es evidente la gran desigualdad entre los continentes al comparar la

relación entre consumo energético y población. Por ejemplo, América del norte y Europa representan aproximadamente el 20% de la población mundial y sin embargo consumen cerca del 60% de la potencia total producida. Mientras que América del sur, África y Oceanía consumen menos del 10% de la energía mundial.

Las principales fuentes de energía en la actualidad son: carbón, petróleo, gas natural, plantas nucleares de fisión y fuentes renovables. Los sectores de mayor consumo de recursos energéticos son: el eléctrico, transporte e industria, comercio y residencia. Los porcentajes de consumo energético por fuente y por sector en la actualidad se muestran en las gráficas 1.2 y 1.3 respectivamente.



Gráfica 1.2. Consumo de energía en el mundo según la fuente. (*BP Statistical review of world energy June 2006*". British Petroleum (June 2006))



Gráfica 1.3. Consumo de energía en el mundo según el sector. (*BP Statistical review of world energy June 2006* . *British Petroleum (June 2006)*)

En las gráficas se observa que aproximadamente el 85% de la energía mundial proviene de fuentes fósiles que en el momento de la combustión generan grandes cantidades de gas carbónico altamente nocivo para el medio ambiente.

El carbón es el principal combustible para la generación de electricidad en el mundo y el petróleo sigue siendo el principal combustible en el sector transporte. Otras opciones como los agrocombustibles y el alcohol carburante, además del riesgo de un posible desabastecimiento de alimentos, siguen generando gases dañinos y la potencia que éstos generan es menor que la generada por la gasolina. Los automóviles eléctricos o híbridos son una gran opción; la potencia de este tipo de autos es menor que en los autos tradicionales y aunque cada vez se mejora el rendimiento de estos vehículos, la gran ventaja se refleja en la reducción de agentes contaminantes dañinos para la preservación del medio ambiente.

El 6% de la energía mundial proviene de plantas nucleares de fisión. La energía nuclear, contrario al pensamiento generalizado, es una de las opciones de energía económica y ambientalmente más viable, además de la inmensa cantidad de energía producida (un millón de veces más que la producida por fuentes fósiles), no presenta emisión de gas carbónico y el daño medioambiental es mínimo, mientras se tomen las adecuadas medidas de seguridad tanto en el manejo de los residuos y en los criterios de diseño y construcción de las plantas, para evitar catástrofes como las famosamente conocidas; las de Japón(yonesawua) y rusia(Chernovyl).

La gran desventaja de la energía nuclear no radica solamente en una posible catástrofe por daños o fallas de un reactor. Las reacciones nucleares producen isótopos radiactivos, útiles en la fabricación de armas de destrucción masiva, transformándose así el tema de la energía nuclear en situaciones problemáticas que encajan mas bien en campos de la economía y de la política.

Otro motivo importante que nos impulsa a la búsqueda de nuevas fuentes de energía es el agotamiento de las reservas de combustible (ver tabla 1).

En la siguiente tabla: 1 Quad equivale a 10^{18} J, para el cálculo de los años totales se asumió que el consumo de energía mundial en un año es de 500 Quads (consumo en el 2001) y que la tasa de consumo se mantiene constante.

FUENTE	RESERVAS DE ENERGÍA (Quads)	USO TOTAL (Años)
PETRÓLEO	10^4	20
GAS NATURAL	10^4	20
CARBÓN	10^5	200
U235	10^4	20
U238, Th232	10^7	20.000
FUSIÓN (D-T)	10^7	20.000
FUSIÓN (D-D)	10^{12}	2000.000.000

Tabla 1 Reservas de energía y uso total por fuente. (Freidberg, J. "Plasma Physics and Fusion Energy", Cambridge University Press, New York, USA. 2007)

Los datos consignados en la tabla exhiben la urgente necesidad de encontrar nuevas fuentes de energía y nuevos combustibles. El petróleo y el gas natural tienden a escasear en cuestión de décadas. El uso de carbón se podría extender por algunos siglos, pero a un costo medioambiental bastante alto y el consumo de energía aumenta constantemente.

1.3 Principales Fuentes de Energía en la actualidad

El Petróleo.

La Gasolina, que se obtiene del petróleo, es el principal combustible del sector transporte que como se mostró en la gráfica 3 asume el 30% del consumo energético total.

La gasolina es un combustible ideal para el sector transporte por su fácil portabilidad, y la cantidad elevada de energía que almacena, en comparación con los alcoholes carburantes, y el gas natural.

Como todos los combustibles derivados de fuentes fósiles, la gasolina genera grandes cantidades de gases de efecto invernadero y como se observa en la tabla 1, las reservas de petróleo son escasas.

El costo de la gasolina es relativamente bajo, sin embargo la carrera por conseguir petróleo, principalmente entre los países más desarrollados, probablemente limitará el suministro de este combustible y aumentará los costos del mismo.

El Carbón.

Actualmente, es la principal fuente para la producción de electricidad en el mundo. Las reservas de carbón podrían agotarse en cientos de años.

La cantidad de carbón requerida para abastecer a una ciudad de 600.000 habitantes durante un año (a la tasa de consumo de un país desarrollado), es el equivalente a llenar un estadio de fútbol.

Una planta típica para generación de electricidad a partir de carbón puede producir cerca de 1GW de potencia suficiente para abastecer una ciudad de aproximadamente 300.000 habitantes en un país desarrollado.

Entre las principales ventajas se cuentan las grandes reservas de carbón y el costo relativamente bajo de producción de electricidad comparado con otras fuentes de energía, la eficiencia de conversión de energía está determinada por ciclos termodinámicos, pero normalmente oscila entre un 30% - 35%.

El principal problema que se deriva de la combustión del carbón es, al igual que en los demás combustibles fósiles, la excesiva producción de dióxido de carbono y otros gases.



Imagen 1. Minas de carbón, La Guajira, Colombia. Las multinacionales BHP Billiton, Anglo American y Xstrata, extraen más de 32 millones de toneladas de carbón al año.

Fuentes de Energía Renovable

La Hidroeléctrica.

Las plantas hidroeléctricas han sido usadas para la generación exclusiva de electricidad, sin embargo solamente cerca del 2%, de la electricidad mundial se genera de éste tipo de fuentes.

El principio de funcionamiento es relativamente simple, se construye un gran dique en el trayecto de un río con condiciones geográfica y tecnológicamente

apropiadas, acumulando así una gran cantidad de agua (Ver imagen 2). La energía potencial que posee el agua se utiliza para mover las turbinas de un generador eléctrico. La cantidad de potencia producida se calcula mediante las ecuaciones de Maxwell de la teoría electromagnética, y la eficiencia no depende de un ciclo termodinámico (ciclo térmico de vapor) lo que se constituye como una ventaja frente a los combustibles fósiles.



Imagen 2. Construcción de la represa El Quimbo, Huila, Colombia. Se destinarán casi 9000 hectáreas de terreno para la construcción del embalse y producirá 400MW, el 4% de la potencia consumida por Colombia en la actualidad. La oposición a este proyecto ha suscitado una importante movilización nacional.

Entre otras ventajas importantes está la no generación de dióxido de carbono y otros gases durante el proceso de producción de electricidad. En una planta hidroeléctrica se pueden producir grandes cantidades de potencia, comparables con una planta termoeléctrica (a partir de carbón). La electricidad producida por plantas hidroeléctricas se suministra de forma estable y constante, salvo casos excepcionales. Los costos de producción de electricidad son bastante bajos, típicamente comparables con los de una planta de carbón.

Por otro lado, la construcción de plantas hidroeléctricas genera impactos negativos e irreparables sobre el ambiente y la sociedad, tal como se argumentó en el tercer párrafo de la introducción.

Los Molinos de Viento.

La energía generada por el viento es una fuente renovable que ha recibido principal atención en los últimos años.

La idea conceptual de la generación de electricidad a partir del viento es fácil de entender. El viento golpea contra unas gigantescas hojas, la energía transferida produce un movimiento de rotación. La energía cinética rotacional se conduce mediante sistemas de engranaje a un generador eléctrico para producir la electricidad.

Al igual que las hidroeléctricas y demás fuentes de energía renovable, la energía del viento no libera gases de efecto invernadero durante el proceso de generación de electricidad. Sin embargo presenta serias desventajas con respecto a las fuentes de energía previas.



Imagen 3. Parque eólico de Palm Springs, California. 16.000 molinos de viento (aerogeneradores) producen 1.700MW de potencia.

La eficiencia máxima de conversión es Aprox. 35%. Es decir, cerca de un tercio de la potencia transferida por el viento al molino se transforma en potencia utilizable. Para abastecer una ciudad como Boston, que consume 2.4GW de potencia, se requieren 4000 molinos de viento que ocupan 400 millas cuadradas.

Boston tiene un área aproximada de 50 millas cuadradas, es decir, se requiere una extensión de terreno 8 veces más grande que el de la misma ciudad, asumiendo que la velocidad del viento es constante y los molinos funcionan a su máxima potencia.

La energía solar.

Al igual que con la energía del viento, tan sólo una pequeña parte de la electricidad total (4%) , generada en el mundo proviene de la energía solar, aunque en la actualidad se proyecta como una alternativa potencialmente atractiva para sustituir los combustibles fósiles.

Claramente, las principales ventajas de este tipo de energías son la no producción de dióxido de carbono y otros gases nocivos para el medio ambiente, es una fuente limpia y renovable.

Para comprender el principio de funcionamiento de las celdas solares es necesario poseer un conocimiento previo de la mecánica cuántica, el estado sólido y la teoría de semiconductores. Para los fines de este trabajo, se asume que las celdas solares tienen un porcentaje de eficiencia de conversión energética de aproximadamente el 10%, es decir, solamente la décima parte de la energía captada del sol se puede convertir en electricidad, esto se convierte en una seria desventaja frente a las otras fuentes de energía.



Imagen 4. *Parque solar fotovoltaico en el estado de Gujarat, India. Ocupara 1.200 hectáreas y producirá 600MW de potencia.*

Retomando el ejemplo, una ciudad que consume 2.4GW de potencia requiere un área aproximada de 50 millas cuadradas llenas de paneles solares que es el área equivalente de una ciudad, es decir, una ciudad de paneles solares.

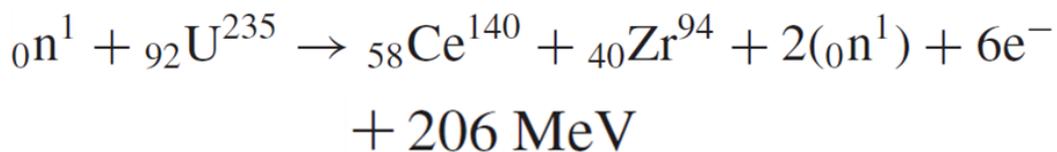
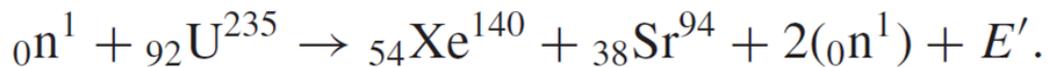
La energía Nuclear de Fisión.

Una reacción nuclear produce aproximadamente un millón de veces más energía por partícula que una reacción química de combustión. En la ecuación 4 se muestra la energía liberada de las reacciones de combustión y fisión, la combustión total del octano libera 94 eV, mientras que la reacción de fisión nuclear del Uranio 235 libera 206 MeV.

Reacción Química de combustión



Reacción de Fisión Nuclear



Ecuación 4. Energía liberada en una reacción química y en una reacción nuclear.

Si hallamos las proporciones macroscópicas de los valores de energía mostrados en la ecuación 4, para hacerse a una idea más clara, observe que la energía por kilogramo de la gasolina es de 40 MJ/Kg, con esta cantidad de combustible un automóvil puede recorrer una distancia de 10 Km. Por otra parte la energía liberada de un kilogramo de Uranio por fisión nuclear es de 84×10^6 MJ/Kg, con esta energía el mismo automóvil podría recorrer la tierra 525 veces.

Las principales desventajas de la generación de energía por medio de las plantas nucleares de fisión ya se discutieron previamente, y se asocian principalmente a la manipulación de los productos radiactivos de la reacción nuclear.

10⁶ toneladas de petróleo

EQUIVALE A:

0.84 toneladas de Uranio

La cantidad de Uranio necesario para abastecer una ciudad de 600.000 habitantes, al ritmo de vida de un país desarrollado durante un año cabría en el remolque de un camión.

Energía termoeléctrica

Al someter un material (semiconductor o metal) ,simultáneamente a un gradiente de temperatura y a una corriente eléctrica, dependiendo del sentido (corriente), se obtendrá una refrigeración o calefacción termoeléctrica . Esta es una solución alternativa a la refrigeración clásica que utiliza ciclos de compresión-expansión ya que no necesita de partes móviles, lo que incrementa su fiabilidad y elimina los ruidos y vibraciones. Estas características son importantes en donde la temperatura debe ser regulada de forma muy precisa y fiable, como por ejemplo en los contenedores empleados en el transporte de órganos para trasplantes o en aquellas en las que las vibraciones son un inconveniente grave, como por ejemplo: los sistemas de guía que emplean láser, o los circuitos integrados. Además, la posibilidad de crear un flujo térmico a partir de una corriente eléctrica de manera directa hace inútil el empleo de gases como el freón, que resultan perjudiciales para la capa de ozono

Por otra parte, la posibilidad de convertir un flujo de calor en corriente eléctrica permite aplicaciones de **generación eléctrica** mediante efecto termoeléctrico, sobre todo a partir de fuentes de calor residual como los tubos de escape de los automóviles, las chimeneas de los incineradores, los circuitos de refrigeración de las centrales nucleares. El uso de esta tecnología supondría en estos casos una mejora en el rendimiento energético del sistema completo de manera «limpia». El calor residual es aprovechado para obtener un mayor aprovechamiento de la energía. Por ejemplo: el empleo de la termoelectricidad en los automóviles permitiría suplir parcialmente el trabajo del alternador, reduciendo así

aproximadamente en un 10% el consumo de combustible. Además, la gran fiabilidad y durabilidad de estos sistemas (gracias a la ausencia de partes móviles) ha motivado su empleo en la alimentación eléctrica de sondas espaciales, como ocurre en la sonda espacial Voyager, lanzada al espacio en 1977. En ella el flujo de calor establecido entre el material fisible PuO_2 (el PuO_2 es radiactivo y se desintegra, constituyendo entonces una fuente de calor) y el exterior atraviesa un sistema de conversión termoeléctrica a base de SiGe (un termopar de silicio y germanio), permitiendo de esta manera la alimentación eléctrica de la sonda (las sondas espaciales no pueden alimentarse mediante paneles solares más allá de Marte, ya que el flujo solar es demasiado débil. (Generador termoeléctrico de radioisótopos).

Como se verá a continuación, los sistemas de conversión que utilizan el efecto termoeléctrico tienen un rendimiento muy pequeño, ya sea generando electricidad o funcionando como refrigeradores, (calefacción). De momento sus aplicaciones están limitadas a sectores comerciales en los que la fiabilidad y la durabilidad son más importantes que el precio, como pueden ser productos generados por electrosoldadura como las rejillas electrosoldadas utilizadas en suelos de plataformas petrolíferas o en industria. Sin embargo la termoelectricidad fue utilizada extensamente en las partes alejadas de la Unión Soviética durante la década de 1920 para accionar radios. El equipo utilizaba barras de bimetalo, un extremo de las cuales se insertaba en la chimenea para conseguir calor, y el otro extremo se ponía en el exterior, en el frío.

Capítulo 2.

TERMOELECTRICIDAD

2.1 Introducción

El primero de los efectos termoeléctricos fue descubierto, en 1821, por T. J. Seebeck quien mostró que podría producirse una fuerza electromotriz mediante el calentamiento de la Unión entre dos conductores eléctricos diferentes. El efecto Seebeck se demostró haciendo una conexión entre dos cables de metales diferentes (ejemplo hierro - cobre). Los otros extremos de los cables van conectados a los terminales del voltímetro. Si se calienta el cruce entre los cables, el medidor registra una tensión pequeña. El arreglo se muestra en la figura 2.1. Los dos cables forman un termopar. Se encuentra que la magnitud de la tensión termoeléctrica es proporcional a la diferencia de temperaturas. Trece años después de su descubrimiento, J. Peltier, un relojero francés, observó el segundo de los efectos termoeléctricos. Encontró que el paso de una corriente eléctrica a través de un termopar produce una pequeña calefacción o refrigeración, efecto que depende de la dirección. El efecto Peltier es bastante difícil de demostrar utilizando termopares metálicos, desde siempre a estado acompañado por el efecto Joule. A veces, uno puede hacer no más que mostrar que hay menos calefacción cuando pasa la corriente en una dirección más que el otro. Si uno utiliza el arreglo que se muestra en la figura 2.1, el efecto Peltier puede demostrarse, en principio, mediante la sustitución del voltímetro por un amperímetro con una fuente de corriente continua y colocando un termómetro pequeño en el cruce del termopar. Parece que no se dieron cuenta inmediatamente que los fenómenos de Peltier y Seebeck eran dependientes el uno del otro. Sin embargo, esta interdependencia fue reconocida por W. Thomson (quien más tarde se convirtió en Lord Kelvin), en 1855. Aplicando la teoría de la termodinámica al problema, fue capaz de establecer una relación entre los coeficientes que describen los efectos Seebeck y Peltier. Su teoría la existencia de un tercer efecto termoeléctrico, que existe en un conductor homogéneo. Este efecto, conocido ahora como el efecto Thomson, consiste en la reversibilidad de calentamiento o enfriamiento cuando hay un flujo de corriente eléctrica y un gradiente de temperatura simultáneamente.

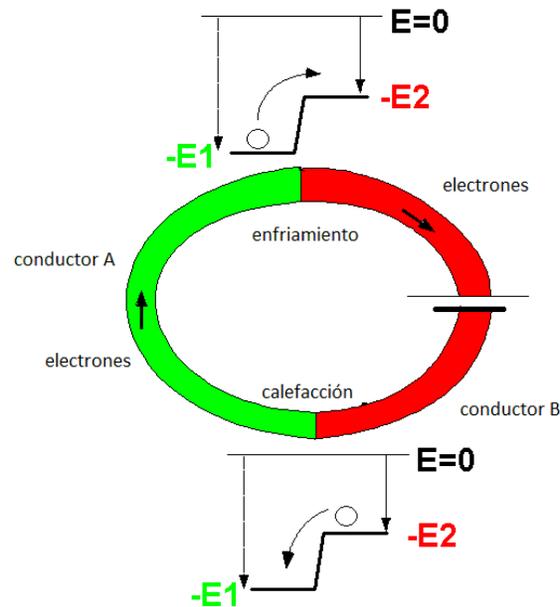


Fig 2.1 efectos Seebeck y Peltier.

El hecho de que los efectos Seebeck y Peltier se efectúen en los cruces y entre dos conductores diferentes, podría sugerir que son fenómenos interfaciales, pero en contraste son muy dependientes de las propiedades de los materiales implicados. Se sabe que la corriente eléctrica circula por un conductor a partir de electrones que poseen energías diferentes en los distintos materiales. Cuando una corriente pasa de un material a otro, la energía transportada por los electrones se altera, y la diferencia aparece como calefacción o refrigeración en el cruce, esto que se conoce como el efecto Peltier. Asimismo, cuando el cruce se calienta, los electrones están habilitados para pasar desde el material que tiene la energía más baja al material que tiene la energía más alta, dando lugar a una fuerza electromotriz. El trabajo de Thomson demostró que un termopar es un tipo de motor térmico y que podría, ser utilizado como un dispositivo para generar electricidad o calor, alternativa vista como una bomba de calor o refrigerador. Sin embargo, los efectos termoeléctricos reversibles siempre están acompañados por los fenómenos irreversibles de joule, en consecuencia los termopares generalmente son bastante ineficientes. El problema de la conversión de energía mediante termopares era analizado por Altenkirch, en 1911. Mostró que el rendimiento de un termopar puede ser mejorado mediante el aumento de la magnitud del coeficiente de Seebeck diferencial, al aumentar la conductividad eléctrica de las dos ramas y reduciendo su conductividad térmica. Desafortunadamente, en aquel momento, no hubo termopares disponibles en el que la combinación de propiedades fuera suficientemente razonable en la conversión de energía eficiente, aunque el efecto Seebeck ha sido utilizado para la medición de la temperatura y para la detección de radiación térmica. Fue sólo en la década de 1950 que la introducción de semiconductores como materiales

termoeléctricos permitió la creación de refrigeradores Peltier bastante prácticos. El Trabajo en termopares con semiconductores también llevó a la construcción de generadores termoeléctricos con una alta eficiencia para aplicaciones especiales. Sin embargo, el rendimiento de convertidores de energía termoeléctricas ha seguido siendo siempre inferior a la de las mejores máquinas convencionales. De hecho, hubo pocas mejoras en materiales termoeléctricos desde la época de la introducción del semiconductor hasta el final del siglo XX. Sin embargo, en los últimos años, varias nuevas ideas para la mejora de materiales se han propuesto y, por último, parece que son avances significativos, por lo menos a escala de laboratorio. Se espera que este trabajo conducirá a un entendimiento mucho más amplio de los efectos termoeléctricos.

2.2 Relaciones entre los coeficientes termoeléctricos

Se asume que los conductores son isotrópicos., nos remitimos al simple termopar que se muestra en la figura 2.2. el conductor A se une a ambos extremos del conductor B, el último se divide en dos partes, y así poder insertar un voltímetro en la brecha. Supongamos que se establece una diferencia de temperatura ΔT entre las dos cruces y que los dos extremos libres del conductor B se mantienen a la misma temperatura, entonces generalmente se encontró que una diferencia de potencial V aparecerán entre los extremos libres. El coeficiente de Seebeck diferencial, α_{AB} , se define como el cociente entre V y ΔT . Por lo tanto,

$$\alpha_{AB} = \frac{V}{\Delta T} \quad (1)$$

α_{AB} , se considera positivo si la fuerza electromotriz tiende a conducir una corriente eléctrica a través de un conductor A desde el cruce caliente hasta la ensambladura fría. Cabe señalar que, particularmente en los textos antiguos, la cantidad que ahora se conoce como el coeficiente de Seebeck se llama a menudo el coeficiente térmico (EMF). Se define el coeficiente de Peltier diferencial, π_{AB} , para el mismo termopar suponiendo que una fuente de EMF denominada coeficiente térmico está conectada a través de la brecha en el conductor B para conducir una corriente en el circuito en sentido horario. El coeficiente de Peltier es considerado positivo si se calienta el cruce en el cual la corriente entra a A y se enfría el cruce en el que deja a A. π_{AB} es igual a la proporción de la tasa q de calentamiento o enfriamiento en cada cruce de la corriente eléctrica, y está dada por:

$$\pi_{AB} = \frac{q}{I}. \quad (2)$$

Donde:

π_{ab} , es el coeficiente peltier, q es el calor e I es la corriente eléctrica.

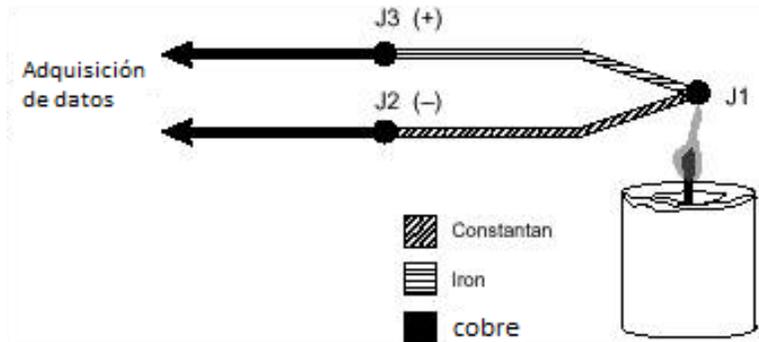


Figura 2.2 Simple termopar

Tomamos nota de que es mucho más simple medir el coeficiente de Seebeck que el coeficiente de Peltier. Por lo tanto, cuando ambas cantidades se introducen en la teoría de la energía termoeléctrica, sería preferible si sólo uno es especificado. De hecho, una de las relaciones de Kelvin nos permite expresar el coeficiente Peltier en términos del coeficiente Seebeck. La ecuación correspondiente es

$$\pi_{AB} = \alpha_{AB} T. \quad (3)$$

La otra relación Kelvin conecta el coeficiente Seebeck y el coeficiente de Thomson, o, mejor dicho, la diferencia entre los coeficientes de Thomson de los dos conductores. El coeficiente de Thomson se define como la tasa de calentamiento por unidad de longitud que resulta de la aplicación de la unidad de corriente a lo largo de un conductor en el cual hay un gradiente de temperatura. La relación apropiada de Kelvin:

$$\tau_A - \tau_B = T \frac{d\alpha_{AB}}{dT}. \quad (4)$$

Dónde: τ_a , coeficiente Thomson para el material A. τ_a , coeficiente Thomson para el material B. T , temperatura. $\frac{d\alpha_{AB}}{dT}$, Cambio del coeficiente seebeck diferencial respecto a la temperatura.

Los coeficientes de Seebeck y Peltier definidos anteriormente son para un par de conductores, considerando que sería mucho más conveniente si sus valores podrían ser dados por un único material. De hecho, los coeficientes diferenciales absolutos de Seebeck o Peltier se pueden encontrar de formas iguales si el segundo material puede considerarse con un coeficiente tan pequeño que tienda a cero. Este concepto puede realizarse, en la práctica, mediante el uso de un superconductor como el segundo material. Es razonable asignar cero para los coeficientes Seebeck o Peltier a un superconductor ya que los coeficientes diferenciales entre todos los pares de superconductores son cero. Por supuesto, no hay ningún material que permanezca en el estado superconductor. Entonces podría pensarse que los coeficientes de Seebeck absolutos de otros materiales pueden obtenerse sólo a bajas temperaturas. Sin embargo, este no es el caso. La anterior ecuación se puede ver de la siguiente manera:

$$\tau = T \frac{d\alpha}{dT} \quad (5)$$

Así pues, si se determina el coeficiente de Seebeck absoluto de un material a bajas temperaturas conectándolo a un superconductor, uno puede entonces utilizar esta ecuación para encontrar el valor de la temperatura más alta después de medir el coeficiente Thomson. Este procedimiento se ha realizado para el plomo metálico, que puede ser usado como material de referencia al determinar los coeficientes absolutos para otras sustancias. En realidad, la mayoría de metales, como el plomo, tiene valores muy pequeños en el coeficiente Seebeck en comparación con prácticas termoeléctricas en materiales que son casi invariablemente semiconductores.

2.3 efectos en un campo magnético

Las cargas eléctricas están sujetas a las fuerzas transversales cuando viajan en un campo magnético. Así, los efectos termoeléctricos, como las otras propiedades de transporte, son cambiadas cuando se aplica un campo magnético, donde aparecen algunos nuevos fenómenos. Estos efectos son llamados termogalvanomagnéticos puesto que pueden afectar el funcionamiento de los dispositivos termoeléctricos y puede incluso conducir a nuevos métodos de conversión de energía. La conductividad eléctrica y térmica son las propiedades de importancia cuando se está calculando el rendimiento de dispositivos basados en los efectos Seebeck y Peltier. Ambas cantidades en un campo magnético, sufren cambios muy pequeños, a menos que el campo sea muy fuerte y la movilidad de los portadores de la carga es alta. Los coeficientes de Seebeck y Peltier, también van a cambiar bajo la influencia de un campo magnético, B. normalmente, el valor del coeficiente de Seebeck será el mismo cuando se invierte el sentido del campo magnético, pero esto no es siempre el caso. Cualquier

diferencia entre los valores del coeficiente de Seebeck sobre reversión del campo se llama el efecto Umkehr. El efecto Umkehr es muy grande para ciertas orientaciones del bismuto (semimetal). Otra consecuencia de la acción de un campo magnético es la necesidad de modificar la relación de Kelvin. La ecuación modificada es:

$$\pi(B) = T\alpha(-B). \quad (6)$$

Cuando se aplica un campo magnético transversal a un conductor de transporte, un campo eléctrico aparece en una dirección perpendicular a la corriente y B. Este es el conocido efecto Hall. El efecto Hall no es inmediatamente relevante en la conversión de energía pero es una herramienta útil para explicar el comportamiento de los portadores de carga. De importancia directa para la conversión de energía son los efectos transversales de Nernst y Ettingshausen. El efecto Nernst, como el efecto Hall, manifiesta como una tensión transversal aparece en un campo magnético, pero depende del gradiente longitudinal de temperatura o el flujo de calor en lugar de una corriente eléctrica longitudinal. El coeficiente de Nernst, N, es definido por la relación:

$$|N| = \frac{dV/dy}{B_z dT/dx} \quad (7)$$

Aquí:

$\frac{dV}{dy}$, campo eléctrico transversal, B_z campo magnético, $\frac{dT}{dx}$, gradiente térmico en

x. El signo del efecto Nernst se da en la Fig.3.3, que ilustra todos los fenómenos transversales termogalvanomagnéticos. El signo del efecto Nernst no depende si son portadores de carga positivos o negativos y, en este sentido, se diferencia del efecto Hall. Los efectos Ettingshausen y Nernst se relacionan uno al otro de la misma manera como los efectos Peltier y Seebeck. El efecto Ettingshausen es un gradiente transversal que es el resultado de un campo magnético transversal y un flujo longitudinal de la corriente eléctrica. El coeficiente de Ettingshausen, P, se define por:

$$|P| = \frac{dT/dy}{i_x B_z} \quad (8)$$

Dónde:

$\frac{dT}{dy}$, gradiente de temperatura transversal.

i_x , es la densidad de corriente longitudinal.

B_z , es el campo magnético.

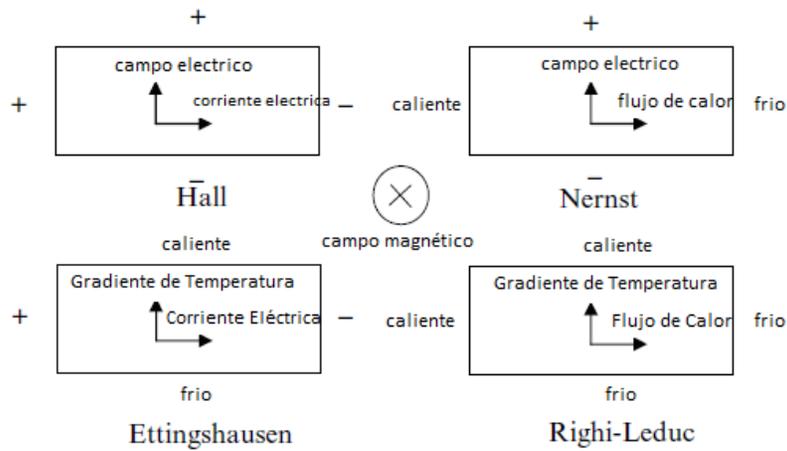
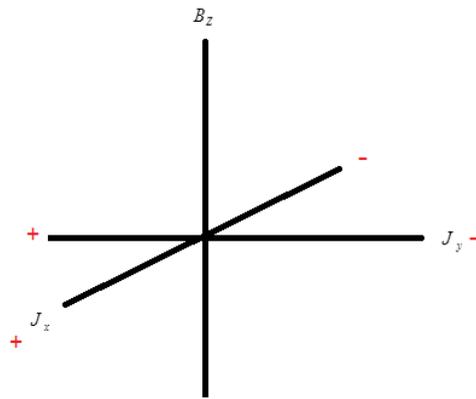
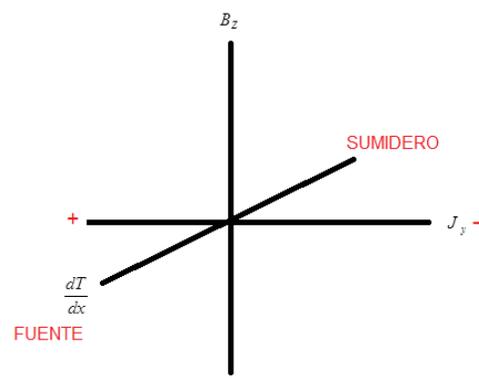


Figura 2.3 efectos termogalvanomagnéticos transversales.

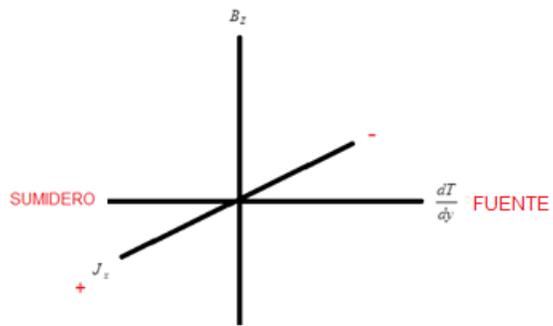
a.



b.



c.



d.

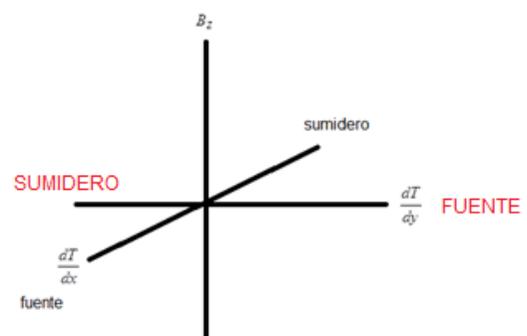


Figura 2.4 Cuando los efectos están en la dirección que se muestra, los coeficientes son positivos, a)Hall, b)Nernst, c)Ettingshausen, d)Righi-Leduc.

/

hay una relación termodinámica entre los coeficientes de Nernst y Ettingshausen, dado por:

$$PK = NT \quad (9)$$

Dónde K es la conductividad térmica, P es el coeficiente Ettingshausen, N el coeficiente de Nernst y T la temperatura. El coeficiente Ettingshausen se define en términos de un gradiente de temperatura en lugar de un flujo de calor. Para completar los fenómenos transversales, existe el efecto Righi – Leduc, que es un gradiente transversal derivado de un flujo de calor longitudinal. El coeficiente de Righi – Leduc, S, está dada por:

$$|S| = \frac{dT/dy}{B_z dT/dx} \quad (10)$$

Donde,

$\frac{dT}{dy}$, Gradiente térmico respecto al eje y.

$\frac{dT}{dx}$, Gradiente térmico respecto al eje x.

B_z , campo magnético.

Capítulo 3.

Teoría de refrigeración termoeléctrica y generación de potencia

3.1 efectos de transporte

Los fenómenos termoeléctricos, son reversibles en el sentido que lo hacen desde ellos mismos, es decir no generan pérdidas termodinámicas. Sin embargo, en la práctica, siempre los acompañan efectos irreversibles generados por la resistencia eléctrica y resistencia térmica. Resulta que el desempeño de cualquier termopar como un Convertidor de energía puede expresarse en términos del coeficiente de Seebeck diferencial y las resistencias térmicas y eléctricas de las dos ramas. Estas resistencias dependen de las conductividades térmicas y eléctricas y las proporciones de longitud al área seccionada transversalmente. Otra vez, en primera instancia, supondremos que todas las propiedades son independientes de la orientación. La resistividad eléctrica ρ es el recíproco de la conductividad eléctrica, σ :

$$I = \frac{\sigma VA}{L} \tag{11}$$

Donde I es la corriente eléctrica a través de una muestra de área transversal constante A y longitud L cuando un voltaje V se aplica. Asimismo, la conductividad térmica λ se define por la ecuación:

$$q = -\frac{\lambda A \Delta T}{L} \tag{12}$$

Donde q es la tasa de flujo de calor a través de la muestra, que tiene una diferencia de temperatura ΔT entre sus dos extremos.

3.2 Refrigeradores termoeléctricos y bombas de calor

Se utilizara el modelo del termopar ilustrado en la figura 3.1 para explicar el funcionamiento de los refrigeradores termoeléctricos y bombas de calor. Los dispositivos, generalmente hacen uso de módulos que contienen una serie de

termopares conectados eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo. Esto permite que el enfriador o bomba de calor pueda ser operado por una fuente de energía que entrega una corriente manejable con una caída de tensión razonable. Es un asunto sencillo extender las ecuaciones para un par o un arreglo multipar. En la teoría elemental se supone que no hay ninguna resistencia termal entre el termopar y la fuente de calor. También se asume que todo el flujo de calor entre la fuente y sumidero ocurre dentro de la termocupla. Por lo tanto, se supone que las pérdidas térmicas de radiación, conducción y convección a través del medio circundante son despreciables.

Las dos ramas de termopar en nuestro modelo tienen área transversal constante. Se hicieron sugerencias que termoelementos cónicos podrían mejorar el rendimiento pero no es difícil demostrar que no dan ninguna ventaja teórica. Los termoelementos no tienen que ser de la misma longitud, pero la proporción de longitud de área transversal (el factor de forma) es de importancia y, como veremos, hay una recomendada relación entre los factores de forma de las dos ramas. La cantidad de mayor importancia para un refrigerador es el coeficiente de rendimiento (COP), que se define como la relación entre el calor extraído de la fuente por el gasto de energía eléctrica. Si el termopar está libre de pérdidas asociadas con la conducción de calor y resistencia eléctrica, el rendimiento alcanzaría el valor ideal, es decir, el valor de un ciclo de Carnot. El rendimiento ideal puede ser mucho mayor que la unidad que viene dada por $T_1 / (T_2 - T_1)$, donde T_1 y T_2 están a la temperatura absoluta de la fuente y sumidero, respectivamente. El interés estará en la energía de enfriamiento; es decir, la tasa de extracción de calor de la fuente.

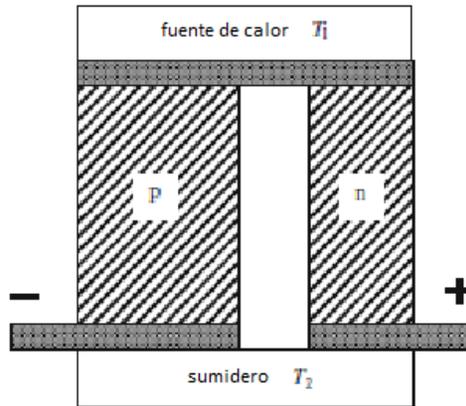


Figura 3.1 Simple refrigerador o bomba de calor

El cálculo del rendimiento de la conversión que realiza un sistema termoeléctrico se efectúa determinando la relación entre el flujo de calor y la corriente eléctrica en el material. Para ello se utilizan las relaciones de Seebeck, Peltier y Thomson pero también las leyes de transferencia de calor y de la corriente eléctrica.

La expresión para el flujo de calor desde la fuente al sumidero (q_1) es:

$$q_1 = (\alpha_p - \alpha_n)IT_1 - (T_2 - T_1)(K_p + K_n) - I^2(R_p + R_n)/2. \quad (13)$$

Donde,

α_p , coeficiente seebeck para el semiconductor tipo p.

α_n , coeficiente seebeck para el semiconductor tipo n.

K_p , conductividad termica para el semiconductor tipo p.

K_n , conductividad termica para el semiconductor tipo n.

R_p , resistividad electrica para el semiconductor tipo p.

R_n , resistividad electrica para el semiconductor tipo n.

T_1 , temperatura de la fuente.

T_2 , temperatura del sumidero.

El siguiente ejemplo presenta el cálculo del rendimiento de la conversión en el caso de la refrigeración (el caso de generación eléctrica puede realizarse haciendo razonamientos análogos). En cada una de las ramas del par, el flujo de calor

generado por el efecto Peltier se opone a la conductividad térmica. El flujo total en las ramas P y N será:

$$q_P = \alpha_P IT - K_P A_P \frac{dT}{dx} \quad \text{y} \quad q_N = \alpha_N IT - K_N A_N \frac{dT}{dx} \quad (14)$$

siendo x , la coordenada espacial K_p y K_n las conductividades térmicas de los materiales y A_p y A_n sus secciones.

El calor que se extrae de la fuente de frío con un flujo q_f es:

$$q_2 = (q_N + q_P)_{x=0} \quad (15)$$

Al mismo tiempo, la corriente que recorre las dos ramas es inicialmente el resultado del calor por efecto Joule $I^2\rho/A$ por unidad de longitud de las ramas. Utilizando la ecuación de Domenicali y suponiendo que el coeficiente Thomson es nulo, hace que α sea independiente de la temperatura, por tanto la conservación de la energía en el sistema se escribe en las dos ramas como:

$$-K_P A_P \frac{d^2T}{dx^2} = \frac{I^2 \rho_P}{A_P} \quad \text{y} \quad -K_N A_N \frac{d^2T}{dx^2} = \frac{I^2 \rho_N}{A_N} \quad (16)$$

Donde ρ_p y ρ_n , son las resistividades de los termoelementos P y N respectivamente.

Considerando las condiciones en los límites, $T=T_f$ en $x=0$ y $T=T_c$ en $x=L_p$ o $x=L_n$. Con L_p y L_n las longitudes de las ramas P y N, T_2 y T_1 las temperaturas de las fuentes de frío y calor, entonces q_2 se escribe como:

$$q_2 = (\alpha_P - \alpha_N)IT_f - K\Delta T - \frac{1}{2}I^2R \quad (17)$$

con K y R la conductividad térmica y la resistencia eléctrica totales de cada una de las ramas del par.

$$K = \frac{K_P A_P}{L_P} + \frac{K_N A_N}{L_N} \quad \text{y} \quad R = \frac{L_P \rho_P}{A_P} + \frac{L_N \rho_N}{A_N} \quad (18)$$

La potencia eléctrica W disipada en el par debida al efecto Joule y al efecto Seebeck es:

$$W = I(\alpha_p - \alpha_N)\Delta T + I^2 R \quad (19)$$

El rendimiento del sistema termoeléctrico de refrigeración corresponde al cociente entre el calor extraído de la fuente fría y la potencia eléctrica disipada, es decir:

$$\eta = \frac{q_2}{W} = \frac{(\alpha_p - \alpha_N)IT_f - K\Delta T - \frac{1}{2}RI^2}{I(\alpha_p - \alpha_N)\Delta T + I^2 R} \quad (20)$$

La tasa a la cual se calienta el sumidero, es, pues, la suma de q_1 y w , y está dada por:

$$q_2 = q_1 + w \quad (21)$$

Para una ΔT dada, el rendimiento depende de la corriente eléctrica que circula. Un valor particular de corriente que permite maximizar bien el rendimiento de la conversión η o el calor extraído de la fuente fría q_2 , es I_q .y

Está dada por:

$$I_q = \frac{(\alpha_p - \alpha_N)T_1}{R_p + R_n} \quad (22)$$

Por un razonamiento similar, el rendimiento de un par P-N usado para generar electricidad vendrá dado por la potencia eléctrica útil consumida por una resistencia de carga R_L , figura 3.2. Con un flujo térmico atravesando el material:

$$\eta = \frac{P_u}{q_c} = \frac{I(\alpha_p - \alpha_N)\Delta T + I^2 R}{(\alpha_p - \alpha_N)IT_c + K\Delta T - \frac{1}{2}(R_L + R)I^2} \quad (23)$$

En este caso también existen dos valores particulares de I que maximizan el rendimiento de la conversión o bien la potencia eléctrica entregada por el sistema.

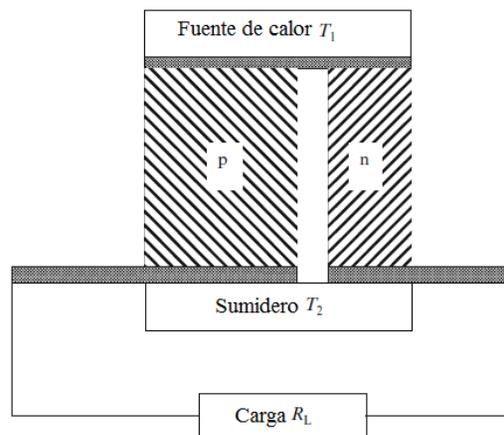


Fig. 3.2 Termopar conectado a una carga R_L

Parámetros importantes

Maximizando estos dos rendimientos de conversión, se puede demostrar que dependen únicamente de las temperaturas T_2 y T_1 y de un número adimensional (sin unidades) $Z_{pn}T_M$ llamado "factor de mérito", (T_M es la temperatura media del sistema, $T_M=(T_2+T_1)/2$) cuya expresión es:

$$Z_{pn} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)}{RK} \quad (24)$$

Hay que remarcar que para un par termoeléctrico cualquiera, el valor de Z_{pn} no es una propiedad intrínseca del material, sino que depende de las dimensiones relativas del módulo, dada la relación existente entre las dimensiones de R y K (resistencia eléctrica y la conductividad térmica). El rendimiento de conversión del sistema (funcionando como generador eléctrico o como dispositivo de refrigeración) es máximo cuando Z_{pn} es máximo, es decir, cuando el producto RK es mínimo, lo que sucede cuando:

$$\frac{L_n A_p}{L_p A_n} = \left(\frac{\rho_p K_p}{\rho_n K_n} \right)^2 \quad (25)$$

En este caso, el factor de mérito Z_{pn} se convierte en una función exclusiva de los parámetros intrínsecos de los materiales:

$$Z_{pn} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{(\sqrt{K_p \rho_p} + \sqrt{K_n \rho_n})^2} \quad (26)$$

Así, para conseguir un óptimo rendimiento de la conversión conviene elegir los materiales que forman el par de forma que se maximice Z_{pn} . Como regla general, esto no se limita simplemente a optimizar los factores de mérito individuales de cada material que forma el par. En la mayoría de temperaturas utilizadas en la práctica, y sobre todo en aquellas empleadas para la generación de electricidad, las propiedades termoeléctricas de los mejores materiales de tipo P y N son similares. En estos casos, el factor de mérito del par es próximo al valor medio de los factores de mérito individuales, y es razonable el optimizar los factores de mérito de cada uno de los materiales de forma independiente.

La optimización de los materiales para su empleo en la conversión de energía mediante efecto termoeléctrico pasa pues necesariamente por la optimización de sus propiedades de conducción eléctrica y térmica, de manera que se maximice el factor de mérito:

$$ZT = \frac{\alpha^2}{\rho K} \quad (27)$$

Así pues, un buen material termoeléctrico poseerá simultáneamente un coeficiente Seebeck elevado, una buena conductividad eléctrica, y una reducida conductividad térmica.

Es importante darse cuenta que z no puede utilizarse para calcular el rendimiento de un termopar, incluso si su valor es conocido por ambas ramas. Para ello, debe utilizarse la figura de mérito Z . Sin embargo, a menudo resulta que Z se encuentra cerca de la media de z_p y z_n así es significativo seleccionar materiales sobre la base de la figura individual-material de mérito.

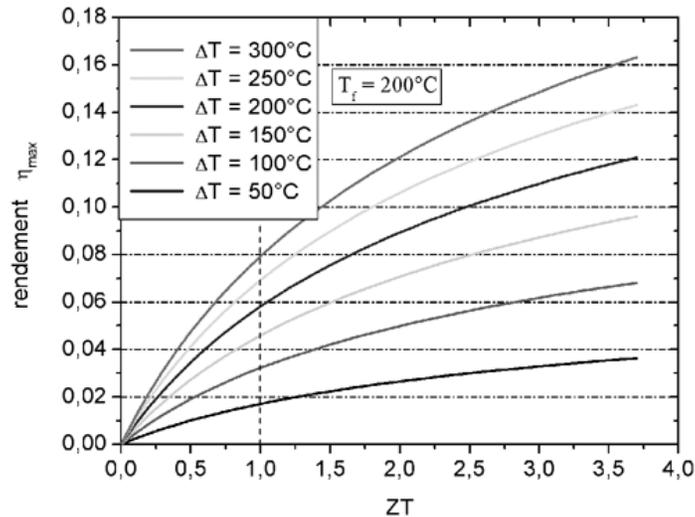


Fig 3.3 Rendimiento vs coeficiente de mérito

La figura 3.3 muestra la evolución del rendimiento de conversión de un sistema termoeléctrico en las condiciones ideales en función del factor de mérito ZT . Por ejemplo, si $ZT=1$ y la diferencia de temperatura es de $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, el rendimiento de conversión será del 8%, lo que significa que según el caso considerado (generación de electricidad o refrigeración) que el 8% del calor que atraviesa el material será convertido en electricidad, o bien que el calor extraído por el elemento refrigerador corresponderá al 8% de la potencia eléctrica empleada.

3.3 Dispositivos con etapas múltiples

Si se tiene una unidad termoeléctrica que opera en varios rangos de temperatura entre la fuente y sumidero, es poco probable que se utilice un solo par de materiales del termopar. Por lo tanto, las dos piezas a menudo constan de termoelementos segmentados. Se trata de dispositivos con etapas múltiples, que

proporcionan una forma de ampliar la diferencia de temperatura máxima para un refrigerador termoeléctrico más allá del límite fijado.

Si suponemos que el calor puede transferirse de una etapa a otra sin pérdidas asociadas por resistencia térmica. En un refrigerador de etapas múltiples (cascada), cada etapa, al estar entre la fuente de calor y el sumidero, tiene una capacidad de enfriamiento mayor que la anterior. Esto es porque cada etapa rechaza no sólo el calor que se extrae de la etapa anterior, sino también el efecto joule de calor que se genera en su interior. Suponiendo que las etapas son de N cascadas y que el rendimiento de la n -ésima etapa es igual a ϕ_n , entonces, si q_N es la tasa de enfriamiento de la etapa N th, en contacto con la fuente de calor, la tasa de enfriamiento para la n -ésima etapa viene dada por:

$$q_n = q_N \left(1 + \frac{1}{\phi_N}\right) \left(1 + \frac{1}{\phi_{N-1}}\right) \cdots \left(1 + \frac{1}{\phi_{N-n}}\right) \quad (28)$$

La tasa a la cual se entrega calor al sumidero por la primera etapa es

$$q_n = q_N \left(1 + \frac{1}{\phi_N}\right) \left(1 + \frac{1}{\phi_{N-1}}\right) \cdots \left(1 + \frac{1}{\phi_1}\right)$$

y el rendimiento general está dada por:

$$\phi = \left[\left(1 + \frac{1}{\phi_N}\right) \left(1 + \frac{1}{\phi_{N-1}}\right) \cdots \left(1 + \frac{1}{\phi_1}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (29)$$

Para simplificar los cálculos, se supone que cada etapa tiene el mismo

Rendimiento, ϕ_s . Entonces, el rendimiento total es :

$$\phi = \left[\left(1 + \frac{1}{\phi_s}\right)^N - 1 \right]^{-1} \quad (30)$$

Es razonable suponer que cada etapa opera con el rendimiento máximo. Entonces se puede usar la ecuación anterior para determinar el rendimiento en cascada. Será necesariamente una aproximación si la diferencia de temperatura entre la fuente y el sumidero es grande, desde luego es más improbable que se

pueda tener rendimientos iguales para todas las etapas. Como se mueve de la enésima etapa hacia la primera etapa, la potencia aumenta. Por lo tanto, una cascada termoeléctrica tiene una forma piramidal, como se muestra esquemáticamente en la Fig. 3.4. Suponiendo que todos los termopares son similares y que se logre una refrigeración eficiente, al aumentar el número de pares. Se calcula el rendimiento total para cuatro etapas, suponiendo además, que ZT tiene el mismo valor de 0,7 a través de todo el dispositivo. Los resultados se muestran en la figura 3.8. El rendimiento se enfrenta a la temperatura de la fuente de calor con el disipador de calor en 300K. Cuando el coeficiente es muy pequeño, se puede suponer que se ha alcanzado el límite de enfriamiento. Por lo tanto, el enfriador tiene una temperatura mínima alrededor de 230K. Las temperaturas mínimas para las segunda, tercera y cuarta etapa, son de (160, 180 y 140) K, respectivamente. Enfriadores comerciales de varias etapas no se comportan bastante bien, así como lo indican estas curvas teóricas de las etapas de módulos suministrados por Marlow Industries Inc.

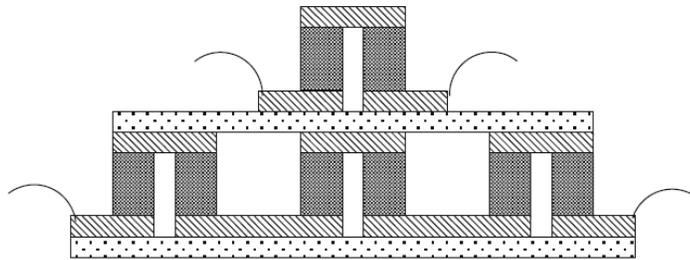


Figura 3.4 arreglo esquemático de una cascada termoeléctrica de dos etapas. Las etapas son eléctricamente aisladas una del otro pero en buen contacto térmico.

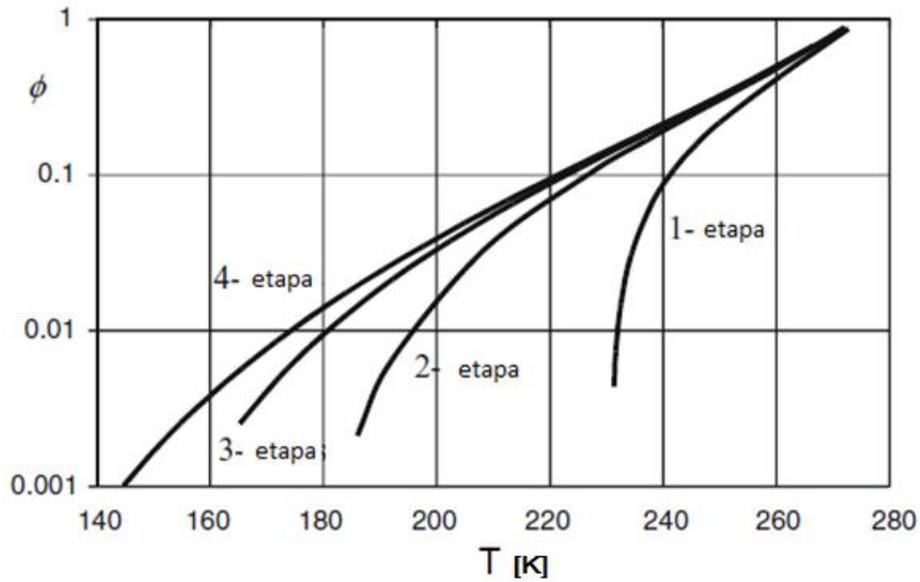


Figura 3.5 coeficiente total de rendimiento contra la temperatura de la fuente de calor para 1, 2, 3, y 4 etapas de refrigeradores. El disipador de calor es de 300 K y $ZT = 0,7$.

Se encontró que a una temperatura mínima de unos 230K, de acuerdo con la teoría, una cascada de dos etapas rindió unos 200 K. Incluso una de las etapas en cascada no pudo llegar a una temperatura inferior alrededor de 170 K. Esto es, principalmente, al hecho de suponer un valor demasiado alto para ZT asumido por los cálculos en las temperaturas más bajas. Sin embargo, es notable que las temperaturas substancialmente por debajo de 200K, pueda lograrse en las prácticas mediante varias etapas de refrigeradores con un calor a temperatura de 300 K.

3.4 aplicaciones de los efectos magnetotérmicos

Aunque los efectos transversales termomagnéticos aún no han encontrado muchas aplicaciones prácticas, el efecto Ettingshausen es potencialmente superior al efecto Peltier para refrigeración a bajas temperaturas. El efecto de Nernst también ofrece algunas ventajas sobre el efecto Seebeck en la detección de radiación térmica. Existe una estrecha correspondencia entre las ecuaciones que describen la potencia y el rendimiento para refrigeradores Ettingshausen y

Peltier. La figura de mérito puede ser utilizado para la conversión de energía termomagnética transversal que es similar a la figura de mérito Z que se utiliza para termopares. Un refrigerador Ettingshausen podría tomar la forma de una barra rectangular, como se muestra en la figura 3.6. Se hace pasar una corriente a lo largo de la barra y se aplica un campo magnético adicional en una dirección perpendicular. Entonces hay un flujo transversal de calor normal a la corriente y al campo magnético. La fuente de calor y el sumidero son térmicamente adjuntos al material termomagnético. Las superficies equipotenciales cerca del centro de la barra están inclinadas al plano yz debido al efecto Hall, pero cerca de los extremos del material estas superficies se encuentran normales. Se supone que la muestra es mucho más larga en la dirección x, que en la dirección y.

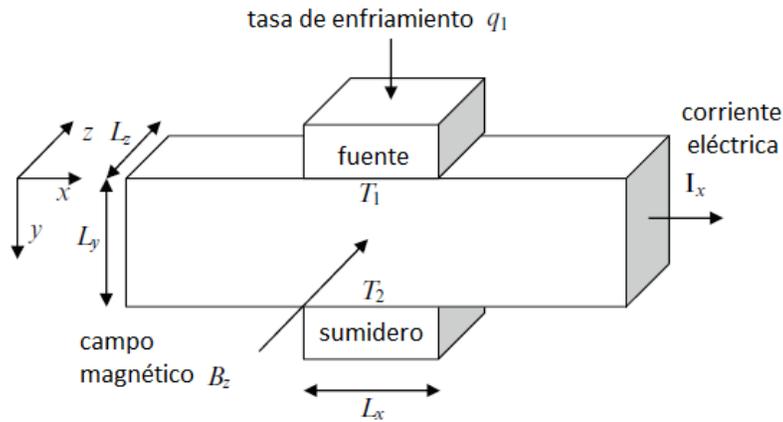


Figura 3.6 Elementos de un refrigerador Ettingshausen. La fuente de calor está en $Y=0$ y el disipador de calor en $y=L_y$.

Se asume al coeficiente Nernst, la conductividad eléctrica y la conductividad térmica independientes de la temperatura. Una suposición razonable es, que las diferencias de temperatura en la mayoría de dispositivos termomagnéticos probablemente sean bastante pequeñas. Utilizamos la relación termodinámica:

$$P\lambda = NT \quad (31)$$

para eliminar el coeficiente Ettingshausen, P, a favor del coeficiente de Nernst, N. Entonces, la corriente I_x en el campo magnético B_z da lugar a un flujo de calor Ettingshausen:

$$NB_z I_x T L_x / L_y$$

Este flujo de calor tiende a oponerse por conducción térmica en la tasa de

$$\lambda L_x L_z dT/dy.$$

Por lo tanto, para cualquier valor particular de y

$$q = \frac{NB_z I_x T L_x}{L_y} - \lambda L_x L_z \frac{dT}{dy}. \quad (32)$$

Al mismo tiempo, habrá efecto Joule de calefacción que perturbará la linealidad del gradiente de la temperatura según la relación

$$\frac{I_x^2 \rho L_x}{L_z L_y^2} = -\lambda L_x L_z \frac{d^2 T}{dy^2}. \quad (33)$$

Puesto que la generación de calor por unidad de longitud es igual a

$$I_x^2 \rho L_x / (L_z L_y^2)$$

Ahora aplicamos las condiciones de límite a la temperatura, que es igual a T1 cuando y=0 y T2 cuando y=Lx así encontramos que dé (34) y (35):

$$\lambda \frac{dT}{dy} = -\frac{I_x^2 \rho (y - \frac{1}{2} L_y)}{L_z L_y^2} + \frac{(T_2 - T_1) \lambda}{L_y}. \quad (34)$$

y el calor en la fuente:

$$q_1 = \frac{NB_z I_x T_1 L_x}{L_y} - \frac{\lambda L_x L_z (T_2 - T_1)}{L_y} - \frac{I_x^2 \rho L_x}{2 L_z L_y}. \quad (35)$$

Que es de la misma forma que q1, en un refrigerador termoeléctrico

Comparando (34) y (37), se encuentra que (37) tiene:

$$NB_z L_x / L_y$$

en lugar de

$$(\alpha_p - \alpha_n), \lambda L_x L_z / L_y$$

Y en lugar de K,

$$\rho L_x / (L_z L_y)$$

en lugar R. Esto significa que podemos hacer uso de las ecuaciones para el rendimiento que derivamos de un refrigerador termoeléctrico, si se hace las substituciones apropiadas, para un refrigerador Ettingshausen. La figura termoeléctrica de mérito, Z, es reemplazada para un efecto magnetotérmico o Nernst – Ettingshausen, dada por:

$$Z_{NE} = \frac{(NB_z)^2}{\rho\lambda} \quad (36)$$

El coeficiente de Seebeck diferencial, $\alpha_p - \alpha_n$ es remplazado por NBz que es llamado el poder termomagnético, así como el coeficiente de Seebeck es a veces conocida como poder termoeléctrico. En este punto, debemos llamar la atención sobre la importancia de definir más precisamente la figura magnetotérmica de mérito y las cantidades de la cual depende. La cuestión de la definición ha sido discutida por Delves y Horst . Brevemente, la cantidad ZNE que está tan estrechamente relacionado con la figura de mérito, Z termoeléctrica, debería más bien definirse como la figura termomagnético adiabático de mérito como distinto de la figura termomagnético isotérmico de mérito Z_{NE}^i . Considerando que Z_{NE}^i Se encuentra entre los límites teóricos 0 y 1 Se define el coeficiente isotérmico de Nernst para corrientes eléctricas cero y gradientes transversales cero. La resistividad eléctrica isotérmica requiere que no haya tanto corriente eléctrico transversal como gradientes de temperatura. Esta resistividad es la que se utiliza en la definición de la figura de Nernst – Ettingshausen isotérmica de mérito. Por otro lado, la figura de mérito ZNE, adiabática se define en términos de la resistividad adiabática, que requiere gradiente transversal cero y flujo de calor longitudinal cero, Las similitudes entre las ecuaciones formales para la refrigeración termoeléctrica y efectos termomagnéticos no significa que no hay diferencias significativas entre las dos técnicas. Cuando uno utiliza los efectos termomagnético, allí es sólo un material, para que la optimización de las

dimensiones relativas de los dos elementos ya no sea un requisito. Sin embargo, una diferencia importante radica en la separación de las direcciones de la corriente eléctrica y el flujo del calor. Generalmente hay un gran número de pares en un módulo de enfriamiento termoeléctrico, y su potencia es significativa, no sería práctico usar un par con una gran área transversal. Un par tendría que entregar una corriente muy grande a muy baja tensión. Sin embargo, en un enfriador magnetotérmico, una barra de material puede ser suficiente. Sería posible tener una pequeña área transversal en la dirección del flujo de corriente eléctrica y una gran área transversal en la dirección del flujo de calor. Los termopares a menudo se utilizan como detectores térmicos, pero es difícil lograr un rápido tiempo de respuesta para tales dispositivos. El tiempo de respuesta es proporcional al espesor en la dirección del flujo de calor. Sin embargo, si uno va a disminuir la longitud de un termopar, la tensión de salida para un flujo de calor determinado es más pequeña. En un detector magnetotérmico, el voltaje de salida depende del gradiente de temperatura en lugar de la diferencia de temperatura. Es, por tanto, posible utilizar una capa delgada de material termomagnético que combine una respuesta rápida y una alta sensibilidad. Es, sobre todo, fácil de hacer una cascada basada en el efecto magnetotérmico transversal. Para una corriente dada, la potencia es inversamente proporcional a la dirección y al grosor. Así, en lugar de cambiar el número de elementos de una etapa a otra, como en una cascada termoeléctrica, uno puede utilizar un número de barras de diferente espesor, como se muestra en la figura 3.7. Todas las barras tienen la misma longitud en la dirección x y el mismo ancho en la dirección del campo magnético. Sin embargo, hay un método de obtención de módulos en cascada con etapas infinitas, utilizando una sola hoja de material termomagnético. La muestra tiene una forma que es mucho más amplia en el disipador de calor que está en el origen, como se muestra en la figura 3.8. La diferencia de potencial, V ; entre los extremos sigue siendo el mismo para todos los valores de y . considérese la sección de espesor Δy que está delimitada por las líneas discontinuas en la figura 3.8. Si se considera esta sección como una de las etapas de la cascada en su rendimiento óptimo se tiene:

$$\phi_y = \frac{T}{\Delta T} \frac{(1 + Z_{NE}T)^{1/2} - 1}{(1 + Z_{NE}T)^{1/2} + 1} \quad (37)$$

Entonces, la relación entre el calor $(q_y + \Delta y)$ y q_y , es:

$$\frac{q_y + \Delta y}{q_y} = 1 + \frac{\Delta T}{T} \frac{(1 + Z_{NE} T)^{1/2} + 1}{(1 + Z_{NE} T)^{1/2} - 1} \quad (38)$$

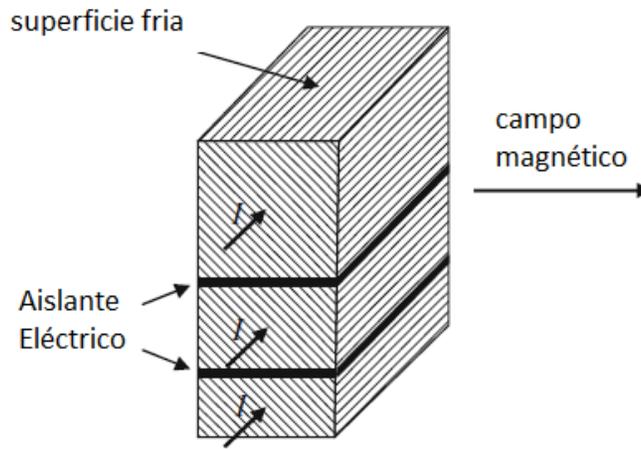


Figura 3.7 refrigerador de tres etapas Ettingshausen

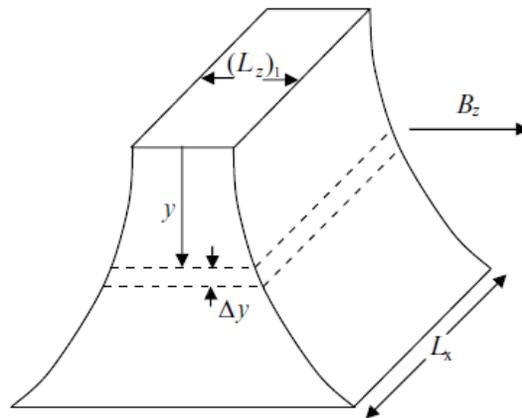


Figura 3.8 forma exponencial Ettingshausen en cascada. El calor es extraído de la fuente en la cara superior.

La proporción de la anchura en la dirección z, es :

$$(L_z + \Delta L_z) / L_z$$

Si nos indican

$$(1 + Z_{NE}T)^{1/2} \text{ by } M_{NE}$$

Podemos escribir

$$\frac{\Delta L_z}{L_z} = \frac{M_{NE} + 1}{M_{NE} - 1} \frac{\Delta T}{T} \quad (39)$$

Esto conduce a una ecuación integral para resolver después de hacer la siguiente suposición:

$$[(M_{NE} + 1)/\{T(M_{NE} - 1)\}(dT/dy)]$$

La solución es:

$$L_z = (L_z)_1 \exp \left(\frac{M_{NE} + 1}{T(M_{NE} - 1)} y \frac{dT}{dy} \right) \quad (40)$$

La Ecuación anterior nos muestra que podemos realizar un material en cascada con muchas etapas, mediante un elemento termomagnético de forma exponencial. No es fácil de encontrar una muestra de material en la forma óptima, pero ha sido demostrado que incluso una sección trapezoidal simple produce una mejora sustancial en funcionamiento, encima de una barra rectangular.

Capítulo 4

Módulos termoeléctricos y su aplicación

4.1 El concepto Modular

En principio, un termopar solo puede ser adaptado para proporcionar cualquier Capacidad requerida, como una nevera de enfriamiento mediante la alteración de la proporción de longitud en la superficie transversal. Sin embargo, un par operaría con una tensión muy pequeña y la corriente sería muy grande con excepción de la mínima energía de enfriamiento. Para los propósitos más prácticos, una consecución de termopares están conectados en serie eléctricamente, mientras opera térmicamente, en paralelo. Tal arreglo de termopares es conocido como un módulo termoelectrico. Las características esenciales de un módulo típico se muestran en la figura. 4.1. Los termoelementos en un módulo se unen con tiras de un buen conductor eléctrico como el cobre. Los enlaces de conexión se realizan generalmente en buen contacto térmico con electro aislante de placas que deben estar hechas de material que conduce bien el calor. Muy a menudo, se utilizan placas de alúmina pero estos no son particularmente buenos conductores térmicos, por ejemplo el óxido de berilio, es un buen material para este propósito. A veces, las placas de cerámicas son metalizadas para ayudar en la conexión en las fuentes de calor y sumidero. El número, N; de termopares en un módulo están determinados principalmente por la capacidad y corriente eléctrica máxima de enfriamiento. Supongamos, por ejemplo, que 10W de enfriamiento es necesaria para una aplicación particular, tal nivel de potencia de enfriamiento puede ser adecuado para una pequeña nevera portátil. Uno podría diseñar el módulo para el funcionamiento a máxima potencia o coeficiente óptimo de rendimiento o, probablemente, una condición intermedia. Puede parecer atractiva para tratar de obtener el máximo posible de enfriamiento de un módulo, pero entre más bajo el coeficiente de rendimiento, mayor será la cantidad de calor que tiene que ser eliminado por el sumidero. Uno muy bien podría ahorrar el costo del módulo solamente al pensar más en aumentar la capacidad del disipador de calor. Por otro lado, sería absurdo el intento para operar con máximo coeficiente de rendimiento si la diferencia de temperatura a través del módulo es muy pequeña. Esto es porque la potencia tiende a ser muy pequeño. El coeficiente de rendimiento depende de la diferencia de temperatura entre las ensambladuras del termopar. Esta diferencia de temperatura será más grande entre la fuente y sumidero ya que siempre habrá resistencia térmica.

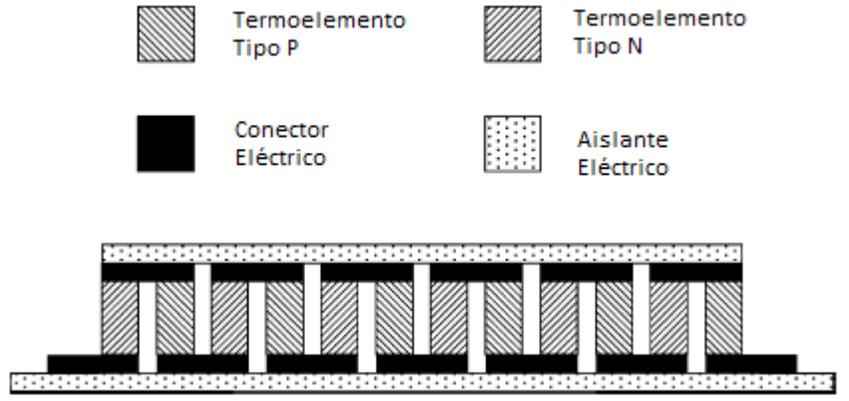


Fig 4.1 diagrama esquemático de módulos termoelectricos

Se debe ser más específico sobre las temperaturas de funcionamiento y las propiedades de los materiales en el módulo. Si se supone que el lado caliente del módulo se mantiene en 300K y que la diferencia de temperatura entre las uniones sea de 40° y debe ser constante, también supondremos que el valor de ZT es igual a 0.8 y que el coeficiente de Seebeck diferencial es $400 \mu\text{VK}^{-1}$. El valor de ZT no es el mejor que se puede lograr, pero es típico de un módulo de buena producción. El rendimiento óptimo es igual a 0.40, la corriente a través de cada termoelemento es $0,0468/(R_p + R_n)$ A, donde la resistencia se expresa en ohmios. Si suponemos que la corriente no debe exceder, 5A, la resistencia $R_p + R_n$ no debe ser menos de $9,4\text{m}\Omega$. La potencia eléctrica por par no es mayor que 0.31W. El coeficiente de rendimiento de 0.4 luego indica que la potencia por par es 0.125W. Por lo tanto, para obtener 10W de enfriamiento, necesitamos unas 80 parejas. Esto sería un número conveniente como podríamos arreglar los 160 termoelementos en una matrix de 16×10 . Determinando las dimensiones de cada termoelemento aunque sabemos que su resistencia debe ser de $4,7\text{m}\Omega$. La resistividad eléctrica de un material termoeléctrico típico es $10^{-5} \Omega\text{m}$, Así que requerimos L/A de $0,47\text{mm}^{-1}$ Por razones que discutimos más adelante en este capítulo, sería difícil reducir la longitud de un termoelemento inferior a 1 mm. Entonces, cada uno tendría una superficie transversal sobre $2,1 \text{mm}^2$ En realidad, los termoelementos en la mayoría de los módulos tienen valores bastante más grandes de L / A que $0,47\text{mm}^{-1}$ sugiriendo que una corriente inferior de 5A es preferible en las aplicaciones típicas. El usuario de refrigeración termoeléctrica se enfrenta a un problema algo diferente. Generalmente se trata de seleccionar uno o más módulos de la gama ofrecidos por un fabricante para cumplir un requisito específico. Se supone que el usuario suministra un conjunto de curvas de diseño

y una gama de tamaños de módulo. La Tabla 4.1 muestra la gama de módulos termoeléctricos.

Número de modelo N	$L/A \text{ mm}^{-1}$	$NA/L \text{ mm}$
MI 1020	7	2.52
MI 1021	17	2.52
MI 1022	31	2.52
MI 1023	71	2.52
MI 1050	35	0.921
MI 1060	7	0.727
MI 1061	17	0.727
MI 1062	31	0.727
MI 1063	71	0.727
MI 1092	31	0.523
MI 1120	31	0.414
MI 1142	31	0.327

Tabla 4.1

Para ilustrar los pasos que se deben adoptar, se limitara a los módulos estándar listados por Marlow Industries en la década de 1970. Los datos de estos módulos son enumerados en la tabla 4.1. Se necesita un conjunto de curvas de rendimiento que se relacionan con la serie de módulos bajo consideración. Estas curvas se basan en la suposición de que todos los módulos hacen uso de los mismos materiales termoeléctricos. La Figura 4.2 muestra el número de termoelementos que varían la temperatura en el cruce caliente. Estas curvas se pueden actualizar cuando se introducen nuevos materiales termoeléctricos. Los parámetros independientes son $I_q L/A$, $q_{\max} L/NA$, V_q/N , y ΔT_{\max} , y se refieren a la corriente, voltaje, refrigeración eléctrica y diferencia de temperatura máxima, respectivamente. La Figura 4.3, muestra $\Delta T/\Delta T_{\max}$ contra el cociente q_1/q_{\max} de potencia en su valor máximo para diversos cocientes de corrientes para máxima potencia. La intersección de cada una de las líneas con la curva, corresponde a la operación con el coeficiente de rendimiento óptimo. Es obvio que el enfriamiento será cero cuando $\Delta T = \Delta T_{\max}$ y, como se mencionó anteriormente, el coeficiente de rendimiento requiere también un enfriamiento muy pequeño cuando la energía $\Delta T \ll \Delta T_{\max}$, las Figuras 4.2 y 4.3 se utilizan en el análisis. Primero se selecciona

la temperatura de ensambladura caliente T_2 y se determina los cuatro parámetros en la Fig. 4.2. Entonces se utiliza la Fig. 4.3 para seleccionar un valor adecuado para I/q , así, el módulo opera en la región a la derecha de la curva interlineada, entre la condición óptima para el coeficiente de rendimiento y la máxima potencia de enfriamiento. De la potencia especificada, entonces se puede determinar un valor aceptable para NA/L . Buist utiliza un ejemplo realista para ilustrar el procedimiento. Se supone que el calor tiene que ser eliminado a un ritmo de 10W de una fuente de calor de 290K y transferido en un dissipador de calor a 350 K. en sentido estricto, son las temperaturas de las ensambladuras fría y caliente, respectivamente.

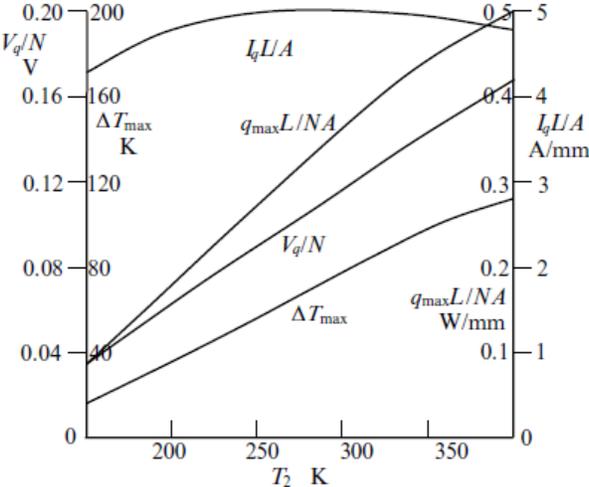


Fig. 4.2 tensión contra temperatura en los cruces calientes para los módulos de la Tabla 4.1

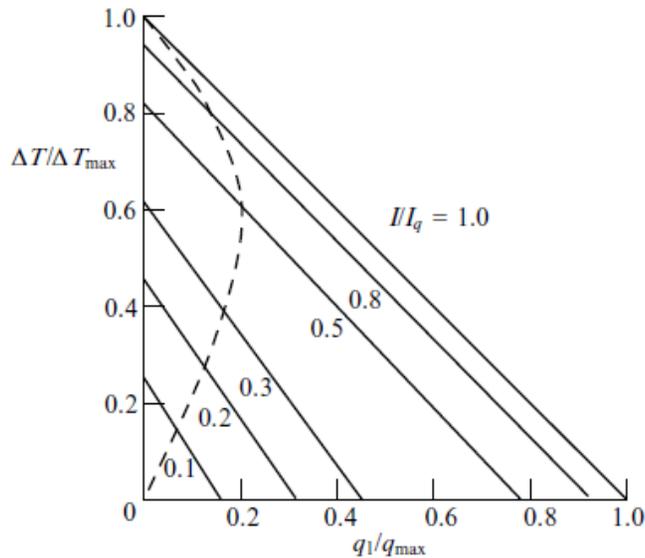


Fig. 4.3 grafica de $\Delta T / \Delta T_{\max}$ contra razón de potencia y potencia máxima de enfriamiento para los módulos de la tabla 4.1 de enfriamiento.

Cada línea continua representa una relación diferente de la corriente a la corriente de energía de enfriamiento máxima. La curva punteada corresponde a las condiciones para un óptimo coeficiente de rendimiento. La figura 4,2 muestra que $\Delta T / \Delta T_{\max}$ equivale a 0,63 y que $q_{\max}L / NA$ es $0.45W / mm^2$. Entonces, a partir de la Fig. 4.3, se encuentra que q_1 / q_{\max} debe medir entre 0,18 para un rendimiento óptimo y 0,36 para máxima potencia de enfriamiento. Puesto que q_1 debe ser igual a 10 W, q_{\max} debe estar entre 55,6 y 27.8W: Esto significa que NA / L debe estar en el rango 123 y 61,7 milímetros. Al referirse a la tabla 4.1, vemos que un número de módulos se puede cumplir con este requisito. Por lo tanto, MI 1063 y MI 1142 tienen valores de NA / L que son razonablemente cerca del valor de 123mm de rendimiento Óptimo y MI 1120 tiene un valor que es más cercano a la máxima potencia. Buist concluyo que MI 1063 sería la mejor opción ya que es ventajoso.

4.2 Problemas de transferencia de calor

Uno de los objetivos de los fabricantes de módulos termoeléctricos es la reducción del tamaño de los termoelementos. El costo de las materias primas es un factor importante y hay otras ventajas que se acumularían si se hicieran más pequeños los módulos y más ligeros. Sin embargo, cuando reducimos el tamaño de un módulo, nos encontramos con problemas asociados con la transferencia de calor.

Cuanto menor sea la superficie transversal del extremo de placas, más difícil es transferir el calor de la fuente al sumidero sin diferencias de temperaturas excesivas. Ciertamente es posible aliviar este problema aumentando el espacio entre los termoelementos, pero esto hace mayor el calor por pérdidas por conducción, convección y radiación. Por lo tanto, hay un espaciado óptimo dando el mejor equilibrio entre resistencia térmica excesiva en las placas de extremo y no deseados de las pérdidas de calor alrededor de la termoelementos. Se analiza este problema usando el modelo que se muestra en la figura 4.4.

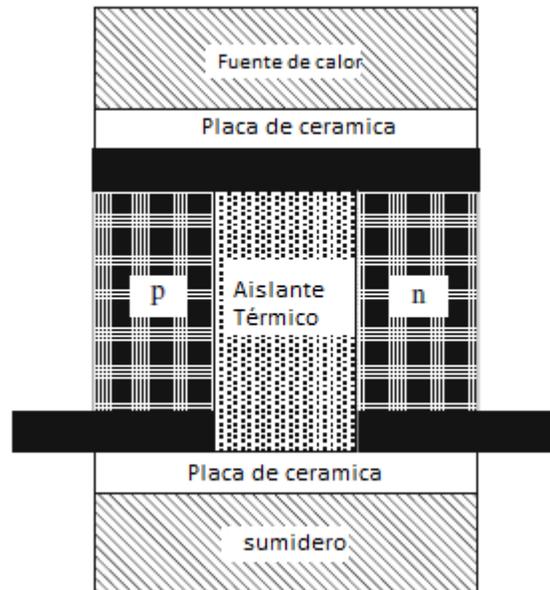


Figura 4.4 modelo para el cálculo de las pérdidas de calor y resistencia térmica.

Se supone que hay aislamiento térmico entre los termoelementos que ocupan una fracción de la zona ocupada por los termoelementos. Este aislamiento tiene una conductividad térmica λ_1 y se asume que no hay pérdidas por radiación o convección. La conducción del calor a través del material aislante aumenta la conductancia térmica por un factor $(1 + \lambda_1 g / \lambda)$, donde λ es la conductividad térmica promedio de los materiales termoelectrónicos. El valor eficaz de mérito se convierte entonces en $Z / (1 + \lambda_1 g / \lambda)$. Insertando el aislamiento entre los termopares se incrementa el área transversal total desde A a $A(1+g)$. Así, si Kc es la conductancia térmica por unidad de área de las placas del extremo, la conductancia térmica de cada placa es $KcA \cdot (1+g)$. Cuando el calor está siendo extraído de la fuente en una tasa q_1 , se entrega al sumidero en $q_1 / (KcA(1+g))$ y $q_1(1+1/\phi)$, donde ϕ es el coeficiente de rendimiento. Las diferencias de temperatura no deseadas a través de las placas del extremo en la fuente y sumidero son iguales a $q_1 / (KcA(1+g))$ y $q_1(1+1/\phi) / (KcA(1+g))$ respectivamente. Por

lo tanto si ΔT^* es la diferencia de temperatura entre el sumidero y la fuente, la diferencia de temperatura a través de los termopares tiene que ser:

$$\Delta T = \Delta T^* + \frac{q_1 (2 + 1/\phi)}{K_c A (1 + g)} \quad (40)$$

El coeficiente de rendimiento se reduce desde $\Delta T > \Delta T^*$.

Es necesario especificar las condiciones de operación. se supone que se quiere obtener la máxima diferencia de temperatura cuando el calor extraído de la fuente es cero. Sabemos que esta diferencia de temperatura equivale a $ZT_1^2/2$ cuando no hay pérdidas de calor ni ninguna resistencia termal en las placas del extremo. La corriente que da la diferencia de temperatura máxima es igual a $(\alpha_p - \alpha_n)T_1/R$ y se encuentra que la potencia de entrada es $(\alpha_p - \alpha_n)^2 T_1 T_2 / R$. Si se establece $(\alpha_p - \alpha_n)^2 T_1 / R$ igual a $(Z\lambda A/L)$ se obtiene:

$$\Delta T_{\max} = \Delta T_{\max}^* + \frac{\lambda Z T_1 T_2}{K_c L (1 + g)} \quad (41)$$

Esto demuestra que la diferencia de temperatura máxima ΔT_{\max}^* entre el sumidero y la fuente es menor que a través de los termopares. Si combinamos las ecuaciones anteriores que incluyen tanto las pérdidas de calor a través del aislamiento y la resistencia térmica a través de las placas de extremo, obtenemos

$$\Delta T_{\max}^* = \frac{1}{2} Z T_1^2 \left[\frac{1}{1 + \lambda_1 g / \lambda} - \frac{2\lambda T_2}{K_c L (1 + g) T_1} \right] \quad (42)$$

El objetivo es acercar la cantidad en los corchetes cerca a la unidad como sea posible. Se aplica esta ecuación para un ejemplo concreto. Si se supone que el módulo está hecho de materiales termoeléctricos excelentes con ZT cerca de la unidad y T_2/T_1 con un valor máximo aproximadamente de 1.4

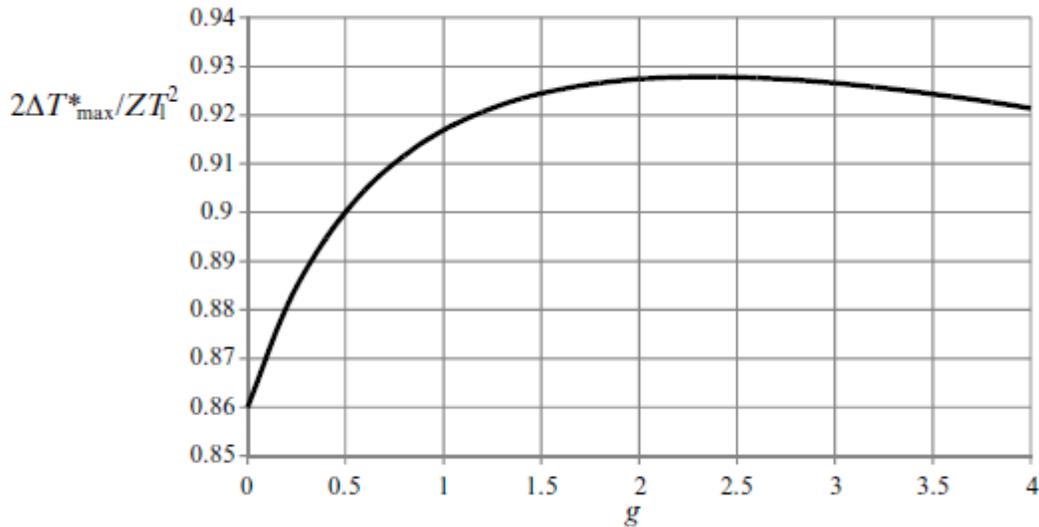


Fig. 4.5 diferencia de temperatura entre el sumidero y la fuente ($ZT_1^2/2$) contra el factor g.

Para buenos materiales termoeléctricos, la conductividad térmica λ sería igual a $1.5\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ y los espacios entre Los termoelementos pueden ser llenados con poliuretano expandido que tiene una conductividad térmica de $0.02\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. La conductividad térmica de alúmina es sobre $30\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ y con el propósito de este cálculo asumimos 1 mm de espesor y una conductancia térmica de $3 \times 10^4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. La figura 4.5 muestra un diagrama del término en los corchetes de (4.3) contra el espaciamento factor g. Se verá que la diferencia de temperatura máxima tiene su valor más alto cuando g es aproximadamente 2. Este valor es igual a aproximadamente el 93% de $ZT_1^2/2$. Se observa que la resistencia térmica de las placas del extremo puede reducirse utilizando el nitruro de aluminio en lugar de alúmina, y un mejor conductor termal es el diamante, aunque por su costo implica descartarlo. De hecho, en muchas aplicaciones prácticas, un factor importante en la disminución del rendimiento de un refrigerador termoeléctrico reside en la resistencia térmica entre las superficies de las placas del extremo de la fuente y sumidero. Incluso si los conductores de cobre sólidos se utilizan para difundir el flujo de calor, puede haber una temperatura substancial en la diferencia de su longitud.

Una solución a este problema radica en el uso de intercambiadores de calor de líquido. Attey muestra una aplicación típica con intercambiadores de calor de estado sólidos, y el coeficiente de funcionamiento del sistema de enfriamiento termoeléctrico fue encontrado para 0.4. En esta aplicación, la diferencia de temperatura entre la fuente y sumidero era solo de 20° y, para los materiales termoeléctricos particulares que se utilizaron en el módulo, el rendimiento teórico era tan alto como en 1.3. El valor de ZT para los termopares fue 0.65, pero debido

a la ineficacia del sistema de transferencia de calor de estado sólido, el módulo se comportaba como si ZT no fuera más de 0,28. Usando líquido para el calor del sistema de transferencia el rendimiento subió a 0,8, correspondiente a un valor eficaz de 0,43 para ZT. Obviamente, hay camino por recorrer antes de que se realice todo el potencial de los módulos de enfriamiento termoeléctricos, pero el trabajo de Attey pone de relieve la necesidad de mejorar el calor de transferencia así como la figura de mérito.

4.3 resistencia de contacto eléctrica

La transferencia de calor no es el único problema que surge cuando intentamos reducir el tamaño de un módulo termoeléctrico. Si hay alguna resistencia eléctrica significativa en los contactos, esto será más evidente cuando la longitud de los termoelementos son hechos más cortos. Es realmente muy difícil de medir la resistencia eléctrica de contacto cuando se utilizan los métodos actuales, para instalar conectores de metal a termoelementos. La verdadera prueba en el desempeño de los termopares como refrigeradores o generadores, es cuando la longitud se hace tan pequeña como sea posible. Semenyuk calcula la resistencia eléctrica de sus contactos en $0.84 \times 10^{-10} \Omega \text{m}^2$. Se vera el efecto de la resistencia eléctrica de contacto sobre el desempeño de los refrigeradores termoeléctricos por Parrott y Penn y se dara un esquema de su tratamiento. Aunque los métodos para la fabricación de contactos eléctricos para materiales termoeléctricos han mejorado desde que se realizó este análisis, en los termoelementos se han vuelto más cortos, así que el problema sigue siendo una constante. El objetivo de Parrott y Penn no fue eliminar el efecto de la resistencia de contacto, sino para tener en cuenta en minimizar la cantidad de material termoeléctrico necesaria para un módulo. Se supone que la resistencia de contacto es igual a r_c para la unidad de la superficie transversal. Entonces, tenemos que:

(43)

$$q_1 = (\alpha_p - \alpha_n) I T_1 - (T_2 - T_1) (K_p + K_n) - I^2 \left(R_p + R_n + \frac{r_c}{A} \right) / 2$$

Para la tasa de consumo de energía eléctrica tenemos:

$$w = (\alpha_p - \alpha_n) I (T_2 - T_1) + I^2 \left(R_p + R_n + \frac{r_c}{A} \right) \quad (44)$$

El efecto es el mismo que el de aumentar la resistencia de las dos ramas de $(R_p + R_n)$ a $(R_p + R_n + r_c / A)$. Alternativamente, la tasa de resistividad eléctrica promedio puede considerarse aumentando ρ a $\rho + r_c / L$. Parrott y Penn aclaran que uno puede proceder asumiendo cualquier disminución en la potencia o un

óptimo coeficiente de máximo rendimiento . A continuación, la máxima potencia de enfriamiento por unidad de volumen viene dado por:

$$\frac{q_{\max}}{AL} = \frac{2\lambda T}{r_c^2 \rho^2} \Gamma_q \quad (45)$$

Donde Γ_q es una función definida por Parrott – Penn, dada por:

$$\Gamma_q = \frac{r_c^2}{\rho^2 L^2} \left[\frac{ZT}{4} \left(1 + \frac{r_c}{\rho L} \right)^{-1} - \frac{\Delta T}{2T} \right] \quad (46)$$

Parrott y Penn define una función similar pero más compleja Γ_ϕ para ser utilizado cuando se maximiza el coeficiente de rendimiento en lugar de la refrigeración.

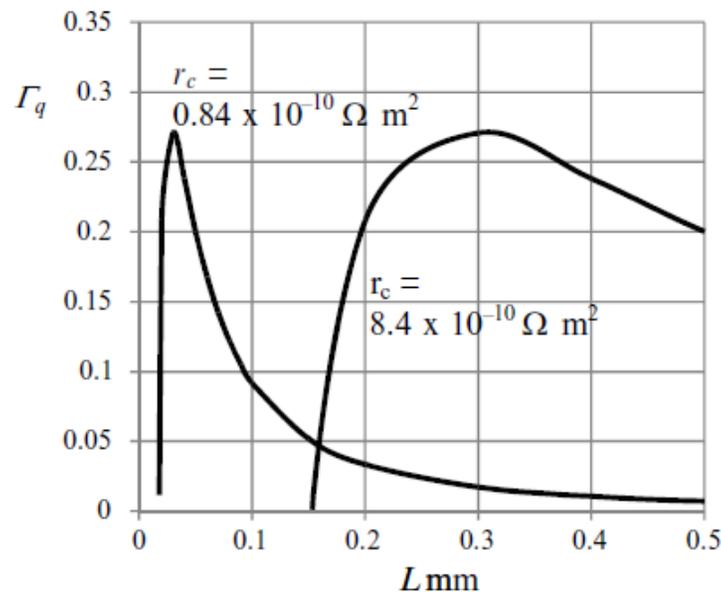


Fig.4.6 Parrott - Penn función Γ_q contra longitud para una resistencia de contacto r_c .

La figura 4.6 muestra a la función Γ_q frente a la longitud de los termoelementos para los valores de resistencia de contacto 0.84×10^{-10} y $8.4 \times 10^{-10} \Omega m^2$, esta última cifra estar cerca del valor más bajo observado por Plekhotkin, Los valores conocidos de ZT y $\Delta T/T$, han sido seleccionados. En ambos casos, hay un máximo para una determinada longitud. Por debajo de este máximo, hay dos

valores de L , que dan una relación específica de enfriamiento del material termoeléctrico, y siempre es preferible para elegir la mayor longitud, ya que esto corresponde al mayor coeficiente de rendimiento. Γ_q , es negativo por debajo apartir de un cierto valor, lo que indica que la diferencia de temperatura especificada ya no puede satisfacerse. En otra palabras, no sería posible obtener el valor para ΔT , alrededor de 20° , si $L=0.1\text{mm}$ y r_c , es tan alto como $8.4 \times 10^{-10} \Omega\text{m}^2$.

4.4 Aplicaciones del efecto Peltier

En la actualidad, el rendimiento de los refrigeradores termoeléctricos es inferior al de las máquinas convencionales tipo compresor. Es probable que la diferencia entre los dos tipos de refrigeradores se volviera más estrecha con el paso del tiempo, el enfriamiento Peltier se limitará a aquellas áreas en las que tiene ventajas obvias. Una de las características de un dispositivo Peltier es que su rendimiento es casi independiente de su capacidad. Por lo tanto, tiene una ventaja decisiva para el enfriamiento de recintos pequeños. Los Fabricantes han considerado, que sea ventajoso en refrigeración termoeléctrica para pequeñas cajas portátiles frías, en particular, cuando la fuente de alimentación disponible es una batería de automóvil de 12V. En este campo, hay competencia de refrigeradores de absorción que tienen la ventaja de trabajar con gas, pero cuando hacen uso de una fuente de energía eléctrica, no son más eficientes que los refrigeradores termoeléctricos. Los dispositivos termoeléctricos son también insensibles al movimiento o inclinación y, debido a esta característica, son atractivos para su uso. Una característica del efecto Peltier es que puede ser utilizado para la calefacción como refrigeración. Por lo tanto, en principio, es posible mantener los alimentos en un recinto que es refrigerado hasta su tiempo de uso, con lo cual puede calentar a la temperatura necesaria para el consumo. Los usos domésticos de refrigeración termoeléctrica han sido revisados por Banney. Uno de los más grandes campos de aplicación está en el aire acondicionado y el calor de bombeo. Muy a menudo, la diferencia de temperatura entre la fuente y el sumidero es pequeña en comparación con el máximo al que se puede llegar. Unidades compresoras hacen frente a esta situación, se encienden durante períodos de tiempo cortos, en contraste con dispositivos Peltier que pueden funcionar continuamente con la corriente óptima. Esto les permite adaptarse fácilmente a los cambios de temperatura del disipador sin refrigeración o calefacción. En 1958, Lindenblad monto un aire acondicionado de una habitación mediante la incorporación de una unidad de refrigeración termoeléctrica en uno de sus muros. Basu afirmó que su aire acondicionado termoeléctrico fue alimentado por una batería solar, y en comparación con un compresor, discrepa notablemente desde el punto de vista del mantenimiento, vida, costo y consumo de energía. Kulagin y Makov utilizan un generador termoeléctrico solar para alimentar su aire acondicionado Peltier, afianzando el sistema para ser autorregulado, puesto que la potencia se levanta con el aumento de la radiación termal entrante. Cabe señalar que Vella utiliza un generador

termoeléctrico para alimentar otro refrigerador termoeléctrico afirmando que esta combinación a habilitado el número de termopares mínimo. Uno de los proyectos más exitosos que implican el uso de aire acondicionado termoeléctrico fue reportado por Stockholm . El objetivo era el control de la temperatura en un vagón de tren de los ferrocarriles nacionales franceses. En diferentes momentos del año, se requiere la calefacción y refrigeración aunque la diferencia de temperatura del aire circundante no suele ser grande. La flexibilidad del efecto Peltier parecería que hacen de esta aplicación particularmente conveniente. Stockholm afirmó que es ventajoso en aplicaciones a gran escala para integrar el cambio con los termoelementos del calor. Estos intercambiadores de calor integrados minimizan la resistencia térmica de la fuente y sumidero y fueron utilizados en el ferrocarril. Sin embargo, pueden presentar problemas estructurales y el enfoque modular es preferido para aplicaciones de pequeña a mediana escala. Ciertamente, los problemas estructurales fueron superados por Stockholm. Los 20 kW aire acondicionado unidad fue operado con éxito en una ruta especial para más de 10 años sin un solo fallo de los componentes termoeléctricos. Sin embargo, en a pesar de este éxito, termoeléctrica aire acondicionadores no han sido instaladas en otros sitios en los ferrocarriles franceses ya que siempre existe cierta renuencia para reemplazar un sistema de existente por uno nuevo a menos que este último tiene una ventaja abrumadora. Tal vez la mayor ventaja de refrigeración termoeléctrica frente a otros sistemas encuentra en la facilidad con la cual puede ser controlado. Esto fue reconocido en los primeros días con aplicaciones como punto de rocío higrómetros y termopares con recintos de referencia. El mantenimiento de un recinto a temperatura constante puede presentar problemas, si se utilizan sistemas convencionales. Por ejemplo, supongamos que la temperatura es sólo unos pocos grados por encima de la temperatura ambiente; un simple calentador entonces puede elevar la temperatura del recinto al nivel especificado, pero una vez que pasa este nivel, la pérdida de calor puede ser un proceso lento. Sin embargo, si se emplea el efecto Peltier la capacidad para calentar o enfriar por pequeñas o grandes cantidades mediante el ajuste de la corriente es una ventaja considerable. Es para la refrigeración de pequeños dispositivos electrónicos y electro-ópticos de enfriamiento termoeléctrico. Unidades con Multietapas son usadas en este tipo de aplicación cuando el recinto es una depresión grande de la temperatura con una potencia pequeña. Por otro lado, en otras situaciones, a menudo son necesarias altas densidades de flujo térmicas con diferencias de temperatura más modestas con gastos siendo una consideración secundaria. Así, si necesario, el dispositivo que se refrescará podría ser montado sobre un sustrato de diamante, que podría proporcionar aislamiento eléctrico con el mínimo de resistencia térmica. Semenyuk ha presentado datos que muestran lo que puede lograrse con materiales de diferentes sustratos. Sus resultados se presentan en forma gráfica en Fig. 4.8. la diferencia de temperatura máxima y la máxima potencia de enfriamiento se trazan contra la longitud de la termoelementos. La región de $L < 10 \mu\text{m}$ es cubiertos por finas termoelementos y requiere sustratos de diamante. $10 \mu\text{m} < \text{sustratos } L < 60 \mu\text{m}$, uno utiliza película gruesa termoelementos y diamante

o aluminio nitruro. Técnicas para hacer termoelementos con L entre 60 y 200 μm están en curso de desarrollo y, de nuevo, nitruro de aluminio o diamante sustratos son necesarios. La región $200 \mu\text{m} < L < 300 \text{ m}$ está cubierto por módulos existentes con placas de extremo de nitruro de aluminio, mientras que para $L > 300 \mu\text{m}$, final de alúmina placas pueden emplearse, aunque nitruro de aluminio dará un rendimiento superior.

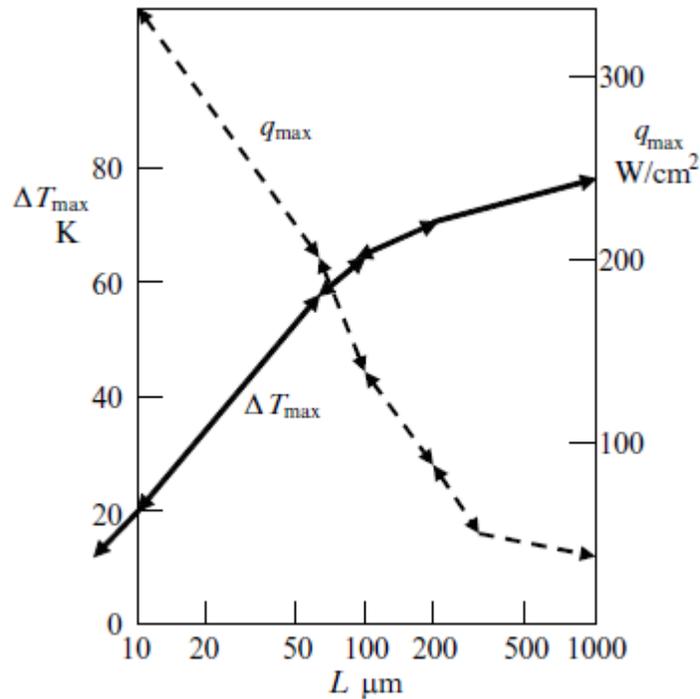


Fig. 4.7 Representación de datos de Semenyuk en módulos termoelectricos para componentes con refrigeración optoelectrónica.

4.5 Efectos transitorios de enfriamiento

Estamos interesados en el comportamiento transitorio de refrigeradores termoelectricos de dos puntos de vista. En algunas aplicaciones, es útil saber cómo rápidamente el sistema responde a los cambios en las condiciones de carga. Además, siempre existe la posibilidad de aumentar la diferencia de temperatura por encima de su valor máximo generalmente durante un tiempo corto aplicando un gran pulso. La teoría transitoria de enfriamiento utilizado por Babin y Iordanishvili se basa en dos termoelementos infinitamente largos que se unen en la posición $x=0$. Se supone que la carga térmica es insignificante. La distribución de la temperatura en cualquier rama tiene que satisfacer la ecuación

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{i^2 \rho}{\lambda} = \frac{1}{\kappa} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (47)$$

Donde, como antes λ y la resistividad eléctrica, conductividad térmica, y la

difusividad térmica, Respectivamente. Cuando el tiempo t , es cero, la temperatura es T_2 en todos los puntos. Cuando $x=\infty$, $\partial T / \partial x = 0$, mientras que para $x = 0$, $\lambda \partial T / \partial x = \alpha I T$ donde se ha asumido que $\pm \alpha$ es el coeficiente de Seebeck de cada rama de la pareja . Aplicando estas condiciones, se tiene:

$$T_2 - T_1 = T_2 \left[(1 - \exp(A^2) \operatorname{erfc}(A)) \left(\frac{zT_2 + 1}{zT_2} \right) - \frac{2}{\pi^{1/2}} \frac{A}{zT_2} \right] \quad (48)$$

En esta ecuación, erfc representa la función de error complementaria y $A = \alpha k^{1/2} i t^{1/2} \lambda$. La depresión de la temperatura en el cruce crece, alcanza un máximo, y luego cae. El máximo se alcanza cuando A satisface la ecuación

$$zT_2 = \frac{\pi^{1/2} A \exp(A^2) \operatorname{erfc}(A)}{1 - \pi^{1/2} A \exp(A^2) \operatorname{erfc}(A)} \quad (49)$$

En la figura 4.8, mostramos una gráfica de $(T_2 - T_1)/T_2$ contra el tiempo en unidades arbitrarias, según para $zT_2=1$. Si la pareja fueran para funcionar bajo steadystate condiciones, el valor máximo de $(T_2 - T_1)/T_2$ sería igual a 0.265. La razón de que la diferencia de temperatura máxima en el modo transitorio es menor es que no hay ningún disipador de calor. Cabe señalar que la diferencia de temperatura máxima no depende de la corriente, un cambio de corriente modifica la escala de tiempo así que $it^{1/2}$ permanece constante para un determinado punto en la curva. Por supuesto, la longitud infinita es realista pero sostiene la teoría para muestras de longitud finita hasta un momento determinado. Como una regla empírica, la aproximación longitud infinita es válida hasta la diferencia de temperatura máxima si la densidad es al menos dos veces lo que produce un enfriamiento máximo en el estado constante. Babin y Iordanishvili demostraron que uno puede obtener depresiones de temperatura transitoria significativamente mayores que el máximo valor de estado estacionario. Usaron una técnica en que primero se aplica un máximo dando corriente constante energía de enfriamiento

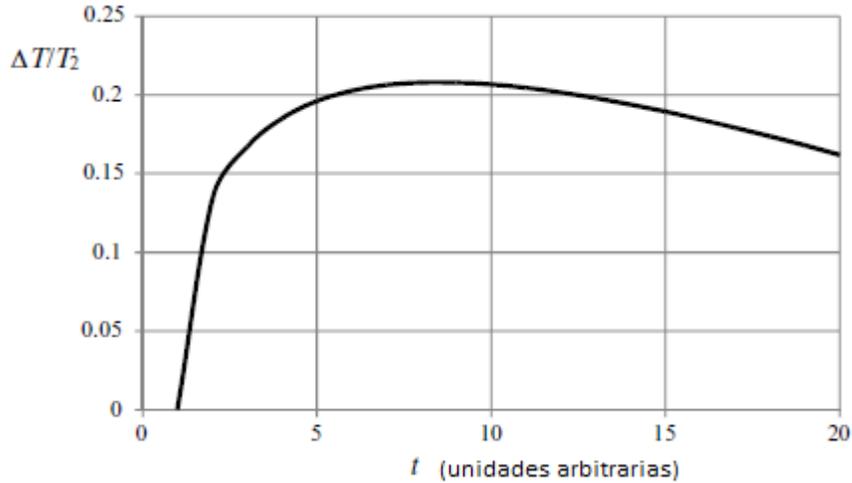


Figura 4.8 depresión de la temperatura en el modo transitorio. $\Delta T / T_2$ contra el tiempo, para un termopar. Después de que se ha establecido el equilibrio, la corriente es mayor a un valor más alto.

$$T(x) = T_2 - \Delta T_{\max} \left(1 - \frac{x}{L}\right)^2 \quad (50)$$

Donde ΔT_{\max} es la depresión de temperatura máxima en el estado estacionario. La densidad de corriente entonces se incrementa por la superposición de i^* al i_q , con lo cual

$$\Delta T = (T_2 - \Delta T_{\max}) \left\{ (1 - \exp(A^2) \operatorname{erfc}(A)) \left[\gamma + \frac{1}{z(T_2 - \Delta T_{\max})} \right] - \frac{2}{\pi^{1/2}} \frac{A}{z(T_2 - \Delta T_{\max})} \right\}, \quad (51)$$

Donde,

$$\gamma = 1 - \frac{2\Delta T_{\max}}{(T_2 - \Delta T_{\max}) \left[(1 + 2zT_2)^{1/2} \right] (1 + i^*/i_q)}. \quad (52)$$

Cuando, $i^* \gg i_q$, $\gamma \rightarrow 1$. $(T_2 - \Delta T_{\max})$. Esto significa que la depresión de temperatura retratada en la Figura 4.9 se superpuso a la diferencia de temperatura máxima en el estado estacionario. Babin y Iordanishvili, mostraron que uno puede aumentar la máxima diferencia de temperatura para un termopar con $Z = 2.5 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ de 70K a 105K por este método. Un cálculo más refinado ha sido llevado a cabo por Hoysos, quien realizó experimentos en el cual, breves impulsos de corriente de gran magnitud eran superpuestos en una corriente constante

mediante un termopar de aleación Teluro de bismuto. El comportamiento transitorio fue mejorado estrechándose las ramas de la termocupla para que el área transversal fuera mucho menor cerca del cruce . Con el disipador de calor mantenido en 290 K, la temperatura mínima de la ensambladura fría en el estado estacionario fue encontrada en 220K. Sobre la aplicación de pulsos de corriente con $i^* \approx 8i_q$, se obtuvo una temperatura de ensambladura fría como 175 K. El de la duración de cada pulso fue 50ms y su recuperación se llevó a cabo en menos de 2s debido a la disminución gradual de los termoelementos. Experimentos similares en corrientes pulsadas han sido realizados por Blum. La mayoría de los trabajos de enfriamiento son mejorados mediante corrientes pulsadas, ha sido de naturaleza exploratoria aplicada al efecto para mejorar el rendimiento de diodos electroluminiscentes GaAs y láseres. La misma corriente pasó a través del termopar y el diodo GaAs, que fue interpuesto entre termoelementos positivos y negativos. La duplicación de la radiación emitida desde el diodo indica una reducción de la temperatura mediante un adicional 50°. Woodbridge y Ertl han demostrado que el enfriamiento transitorio puede ser mejorado usando pulsos. La optimización de la forma del pulso ha sido discutida por Landecker y Findlay. En principio, uno puede reducir la temperatura a cualquier nivel deseado aumentando continuamente la corriente dentro de un pulso. Es necesario seguir aumentando el efecto Peltier para compensar el calor de Joule llegando a la ensambladura fría. En los experimentos realizados por Landecker y Findlay, se midió la temperatura en el cruce después de la aplicación del pulso actual. Supongamos que el pulso se suministra hasta el tiempo τ_1 y la temperatura se mide en el tiempo t_2 . Además, la corriente dentro del pulso es proporcional a $(t_2 - t)^{-1/2}$ Entonces, la temperatura en el momento de la observación está dada por:

$$T = \frac{ZT_2^2}{\pi} \ln \left(\frac{t_2 - t_1}{t_2} \right) \quad (53)$$

Esta ecuación muestra que la temperatura puede llegar a ser menor como el momento de la observación a la vez que se termina el pulso, pero esto también requiere que la corriente tienda a infinito. Sin embargo, parece que se pueden alcanzar temperaturas muy bajas utilizando pulsos formadas por la corriente. Los resultados experimentales se obtuvieron por Landecker y Findlay para el par bismuto –de teluro que se muestran en la figura 4.10. Los resultados obtenidos por Landecker y Finlay son compatibles con las observaciones en pulsos en forma de rampa por Woodbridge y Ertl y por los estudios de Idnurm y Landecker , que eran capaces de generar pulsos en forma en la cual la corriente era proporcional a $(t_2-t)^{-1/2}$, Woodbridge y Ertl también llevaron a cabo experimentos en refrigeración transitorio usando los efectos termomagnéticos transversales. Señalaron que la ventaja de este modo de operación es la eliminación virtual de cualquier masa térmica en la superficie fría, una ventaja que debe encontrarse también para los termoelementos sintéticos transversales. Observaron una depresión de temperatura de 4K por debajo de 80K de bismuto en un campo magnético de 0.8 T

cuando usaron una corriente pulsada, mientras que la máxima diferencia de temperatura era solamente 1,2 K para una corriente constante.

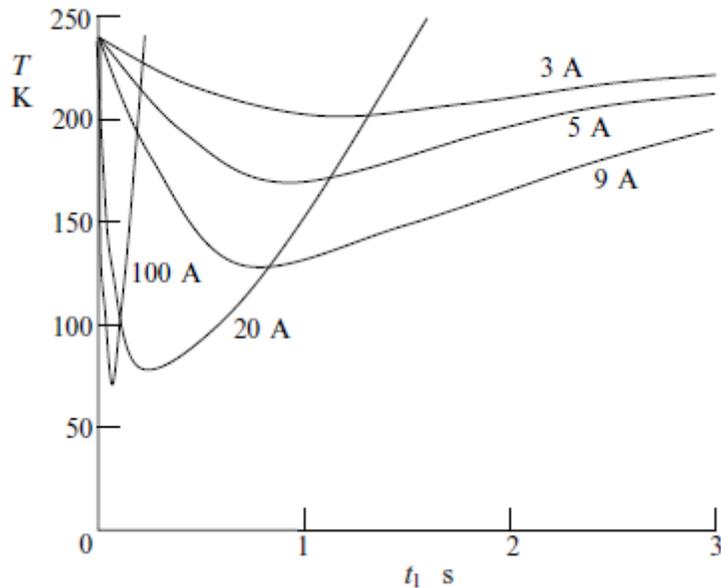


Figura 4.9 temperatura de ensambladura fría contra la longitud del pulso para diferentes valores.

Los pulsos se superponen con una corriente constante de 5A. Datos obtenidos por un par de Teluro de bismuto por Landecker y Finlay Desde el punto de vista práctico, uno necesita hablar de cargas térmicas substanciales de enfriamiento transitorio. Investigado por Hendricks y Buist. Surge un problema cuando se desea obtener una respuesta rápida de un módulo convencional. Desde este punto de vista, uno quisiera reducir la capacidad térmica de los enlaces de cobre, pero, ninguna disminución de espesor puede conducir a una significativa resistencia eléctrica. Uno de los medios para disminuir el tiempo necesario para llegar a una temperatura dada es aumentar la corriente por encima del valor óptimo en estado estacionario durante el período de enfriamiento. Además, en un par en cascada, es una ventaja, para hacer las diferentes etapas con mayor capacidad de enfriamiento, que es el caso si sólo se está considerando la condición de equilibrio. Estas características fueron modeladas con precisión de los cálculos de Hendricks y Buist y el trabajo se extendió posteriormente a los refrigeradores de 3 etapas. La respuesta transitoria de los módulos de etapa única es, por supuesto, una propuesta mucho más simple.

4.6 Dispositivos Seebeck

Aunque la mayoría de las actividades radican en el campo de conversión de energía termoeléctrica, en los últimos 50 años se ha concentrado en la refrigeración, es probable que la generación termoeléctrica se convierta en el aspecto más importante, si la figura de mérito puede mejorarse. Métodos no

convencionales para la generación de electricidad serán buscados como nuevas fuentes de calor . Por ejemplo, puede ser necesario hacer uso del calor, con pequeñas diferencias de temperatura entre la fuente y sumidero. Por supuesto, siempre quedará los campos de aplicación del efecto Seebeck que ya son atractivos en donde la fiabilidad es más importante que la eficiencia. Radio-isótopos y generadores termoeléctricos se han utilizado durante muchos años en vehículos espaciales y, más recientemente, se ha utilizado en energía de fisión. Las ventajas de generadores termoeléctricos frente a otros sistemas incluyen no sólo confiabilidad sino también robustez, larga vida, capacidad de funcionamiento ininterrumpido y la insensibilidad a la radiación y cero degradaciones del medio ambiente. A diferencia de muchos otros tipos de generadores, los dispositivos termoeléctricos son casi independientes de la escala, no tienen partes móviles , están libres de ruidos y de vibraciones. Su característica en corriente – tensión lineal los hace fáciles de controlar. Los primeros radio-isótopos y generadores utilizan termoelementos como Telururo de plomo. Este compuesto y sus aleaciones se consideran los mejores materiales para la interacción con fuentes de calor a temperaturas moderadas pero todavía demasiado alta para bismuto de telururo y sus aleaciones, una eficiencia de más del 5% puede ser alcanzada. Para mejorar la eficacia, al aumentar la figura de mérito de la termocupla o subir la diferencia de temperatura. Por lo tanto, el Telururo de plomo tipo p ha sido reemplazado por aleaciones de TAGS (Te–Ag–Ge–Sb) y para temperaturas más altas, las aleaciones Si – Ge han sido utilizados. Estas medidas han llevado a las eficiencias en el rango de 6 – 7%. La eficiencia es un factor importante en los vehículos espaciales, porque a medida que aumenta la eficacia, se puede reducir el peso tanto del generador como de la fuente de alimentación. La potencia y la masa de los generadores de espacio cubren un amplio abanico. Un generador para un satélite de órbita tierra estadounidense lanzado en 1961 dio una salida eléctrica de 2.7W ,Un generador ruso accionado desde un reactor nuclear tenía una potencia de 5,5 kW y una masa de 1.000 kg.

En cuanto a aplicaciones terrestres, hay un interés en la generación de electricidad de calor residual. Un análisis de las fuentes de calor residual, con especial referencia en Japón, ha sido llevado a cabo por Kajikawa . Es evidente a partir de sus observaciones que hay una gran variación en las temperaturas de las diferentes fuentes, desde 100 a 1000°C. Puesto que es mejor hacer uso de la temperatura más alta disponible , está claro que es necesaria una amplia gama de generadores. En un diseño específico , un termopar de aleación Si – Ge se utiliza con el calor y las temperaturas de la ensambladura fría iguales a 1.123k y 323K, respectivamente. El flujo de calor es 80,4kW / m² y la eficiencia termoeléctrica es del 10,1%. Sin embargo, sólo una fracción del calor disponible puede ser utilizado por el generador cuya eficiencia del sistema es menor que este valor.

Hay un gran número de fuentes de calor a bajas temperaturas que podría ser explotado mediante termopares. La energía geotérmica está disponible en

temperaturas hasta de 200°C. Esta energía puede encontrarse en forma de vapor o de agua caliente. En las temperaturas más altas, utilizable para turbinas de vapor en coche pero cuando la temperatura no es más que 100°C, otros medios de generación son preferidos. La Termoelectricidad parece ser una posibilidad obvia. Debe ser recordado que incluso la eficacia de un ciclo de Carnot es más bien baja cuando la diferencia de temperatura entre la fuente y el sumidero es menos de 100°C. Una baja eficiencia no indica necesariamente un mal factor en sí mismo debido a que el calor es gratuito pero entre menor eficacia sea, más costoso será el sistema de transferencia de calor y generador.

Capítulo 5

Dispositivos transversales

5.1 características de refrigeradores transversales y generadores de potencia

Hay dos métodos por los cuales se puede obtener un gradiente de temperatura transversal, de una corriente eléctrica longitudinal o una fuerza electromotriz transversal de un flujo de calor longitudinal. Ya se han discutido los efectos transversales termomagnéticos y se ha demostrado que puede ser utilizada en la conversión de energía a baja temperatura. También se producen efectos termoeléctricos transversales para orientaciones arbitrarias en los conductores que poseen coeficientes de Seebeck anisotrópicos. Primero consideramos las características inherentes de dispositivos transversales. Aparte del hecho de que hay defectos en las líneas de flujo térmico y eléctrico cerca de los contactos del extremo, la principal diferencia radica en el hecho de que las resistencias eléctricas y térmicas pueden ajustarse independientemente. La resistencia eléctrica en la dirección del flujo de corriente es igual a $\rho_x L_x / (L_z L_y)$ y la conductancia térmica en la dirección del flujo de calor es igual a $\lambda_y L_x L_z / L_y$, Así, mientras que en un termoelemento ordinario el producto de la resistencia eléctrica y la conductancia térmica no se puede modificar al cambiar las dimensiones, esto no sucede cuando se usa un efecto transversal. En el contexto de refrigeración magnetotérmico, la capacidad de hacer etapas infinitas en cascada se da por conformación adecuada de la muestra. Esta característica es compartida por todos los dispositivos transversales. Sin embargo, los termoelementos transversales poseen ventajas sobre los dispositivos termomagnéticos, y la longitud puede ser aumentada indefinidamente mediante la adopción de una configuración de serpentina, como se muestra en la Fig. 5.1. La necesidad de que el campo magnético sea aplicado en una determinada dirección impide esa configuración siendo utilizada en un dispositivo de Nernst – Etingshausen, aunque, en principio, podría elaborarse un arreglo espiral con el campo magnético dirigido a lo largo del eje y el flujo de calor en sentido radial.

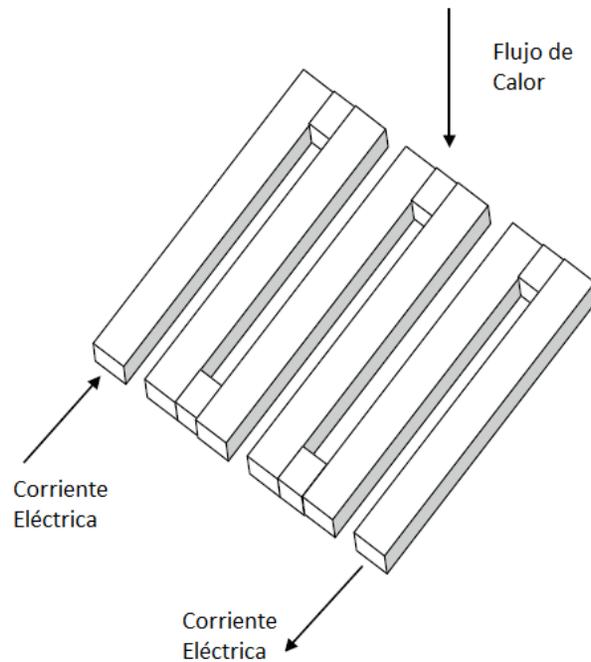


Figura 5.1 forma serpentina de un termoelemento transversal. Aumento en longitud en un arreglo compacto.

5.2 termoelementos sintéticos transversales

Un requisito esencial para un material que se va a utilizar como un termoelemento transversal, es su anisotropía substancial en el coeficiente Seebeck. También debe tener una alta conductividad eléctrica y una baja conductividad térmica, al igual que cualquier otro dispositivo termoeléctrico. En semiconductores extrínsecos, el coeficiente de Seebeck muestra poca anisotropía aunque permite que la estructura cristalina y la conductividad eléctrica - térmica sean dependientes de la orientación. Ciertamente es posible encontrar una gran anisotropía del coeficiente de Seebeck en un conductor intrínseco pero las otras propiedades se vuelven desfavorables. El problema ha sido resuelto mediante el uso de termoelementos sintéticos transversales de dos conductores que tienen diferentes coeficientes de Seebeck. Un requisito es que uno de los conductores debe tener mayor conductividad eléctrica y térmica que el otro. El principio del sistema puede ser entendido con referencia a la figura 5.2, que muestra una estructura laminar compuesto de dos materiales, A y B. Este modelo fue utilizado por Babin como base para su teoría de termoelementos sintéticos transversales. Se supone que $\sigma_A \lambda_A \gg \sigma_B \lambda_B$, Podemos, por tanto, seleccionar el espesor relativo de las capas, y así las resistencias eléctricas satisfacen la desigualdad $R_B \gg R_A$, $k_A \gg k_B$. Sea los coeficientes Seebeck de los conductores A y B, α_A y α_B . En la dirección X_0 , cada componente contribuirá con el coeficiente de Seebeck global proporcional a la diferencia de temperatura entre las superficies. La diferencia de

temperatura a través de cada capa será inversamente proporcional a su conductividad térmica. Por lo tanto,

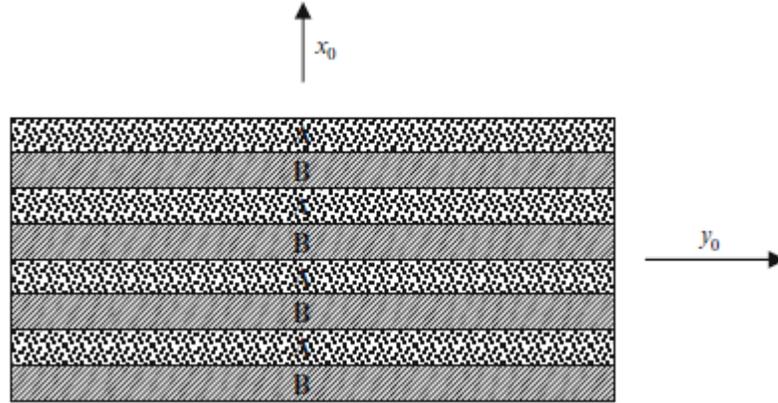


Figura 5.2 Diagrama que muestra el principio de un termoelemento sintético.

$$\alpha_{x_0} = \frac{\alpha_A/K_A + \alpha_B/K_B}{1/K_A + 1/K_B} \quad (54)$$

Aplicando la condición

$$K_A \gg K_B, \alpha_{x_0} \simeq \alpha_B$$

El coeficiente de Seebeck del compuesto en la dirección y_0 es dada por:

$$\alpha_{y_0} = \frac{\alpha_A/R_A + \alpha_B/R_B}{1/R_A + 1/R_B} \quad (55)$$

De $R_B \gg R_A$ se deduce que $\alpha_{y_0} \approx \alpha_A$. En capas compuestas de la forma que hemos descrito no aparece un efecto transversal Seebeck o Peltier, si la corriente pasa paralelo o perpendicular a las capas. Para obtener ese efecto, la muestra debe cortarse con un ángulo. Supongamos que esta muestra está orientada en un ángulo ϕ perpendicular a las capas. También asumimos que los espesores de las capas, d_A y d_B son tales que d_B/d_A es igual a n . Cuando el ángulo ϕ es igual a cero, entonces tenemos que:

$$\alpha_{x_0} = \frac{\alpha_A/\lambda_A + n\alpha_B/\lambda_B}{1/\lambda_A + n/\lambda_B} \quad (56)$$

y

$$\alpha_{y_0} = \frac{\alpha_A \rho_B + n \alpha_B \rho_A}{n \rho_A + \rho_B} \quad (57)$$

También podemos obtener las expresiones para la resistencia eléctrica y la conductancia térmica de la estructura de las capas en las direcciones x_0 y y_0 . En la dirección x_0 , la resistividad eléctrica eficaz de las capas en serie es:

$$\rho_{x_0} = \frac{\rho_A + n \rho_B}{n + 1}. \quad (58)$$

y la conductividad térmica efectiva es:

$$\lambda_{x_0} = \frac{n + 1}{1/\lambda_A + n/\lambda_B} \quad (59)$$

En la dirección y_0 la resistividad eléctrica de las capas en paralelo se convierte

$$\rho_{y_0} = \frac{n + 1}{1/\rho_A + n/\rho_B}. \quad (60)$$

y la conductancia térmica

$$\lambda_{y_0} = \frac{\lambda_A + n \lambda_B}{n + 1} (1 + Z_{AB} T_m) \quad (61)$$

Se observa que la conductividad térmica en la dirección y_0 , aumenta por un factor que incluye la figura de mérito Z_{AB} de una termocupla longitudinal de los materiales A y B. Esto es necesario porque habrá circulación de corriente termoeléctrica en las capas que producirán un efecto Peltier. El valor de Z_{AB} está dada por:

$$Z_{AB} = \frac{(\alpha_A - \alpha_B)^2}{(\lambda_A + n \lambda_B) (\rho_A + \rho_B/n)} \quad (62)$$

Ahora consideramos la situación, cuando $\phi \neq 0$ Entonces, la tensión de Seebeck transversal en la dirección y , debido a un gradiente de temperatura en la dirección x , viene dado por:

$$\alpha_{y\phi x\phi} = (\alpha_{x_0} - \alpha_{y_0}) \sin \phi \cos \phi \quad (63)$$

Y

$$\rho_{x\phi} x\phi = \rho_{x0} \cos^2 \phi + \rho_{y0} \sin^2 \phi. \quad (64)$$

La figura de mérito transversal es:

$$Z_\phi = \frac{\alpha_{y\phi}^2}{\lambda_{y\phi} \rho_{y\phi} \rho_{x\phi}}. \quad (65)$$

Babin, demostró que existe una simple expresión para la figura óptima transversal de mérito cuando $\sigma_A \lambda_A \gg \sigma_B \lambda_B$, Luego se encuentra:

$$Z_\phi^{\max} = z_A \frac{(1 - \alpha_B / \alpha_A)^2}{\left[1 + \sqrt{(\lambda_B \rho_B / \lambda_A \rho_A)} (1 + Z_{AB} T_m)\right]^2} \quad (66)$$

Donde z_A , es la figura longitudinal de mérito para el componente A. Esta expresión es idéntica a una pareja longitudinal A y B aparte del término $(1 + Z_{AB} T_m)$ La figura de mérito es siempre menor que la de un par longitudinal pero la pérdida de rendimiento puede ser bastante pequeña. El ángulo óptimo ϕ puede encontrarse como:

$$\tan \phi_{\text{opt}} = \frac{\sqrt{n}}{n+1} \left[\frac{\rho_A \lambda_B}{\rho_B \lambda_A} (1 + Z_{AB} T_m) \right]^{1/4} \quad (67)$$

Babin, señaló que no contienen la cantidad n que define el espesor relativo de las dos capas. Afirmando que Z_ϕ^{\max} No es críticamente sensible al valor de n . Si la desigualdad $\sigma_A \lambda_A \gg \sigma_B \lambda_B$ no es satisfecha, las ecuaciones para la máxima figura de mérito y el ángulo óptimo se ha vuelto más complicado. Esta situación también fue considerada por Babin quien obtuvo expresiones analíticas en el caso general. Sin embargo, no toma tiempo encontrar Z_ϕ^{\max} y los valores óptimos de ϕ y n entonces puede determinarse por la inspección de. Un valor aproximado de la proporción óptima de los espesores de la capa:

$$n_{\text{opt}} \simeq \left(\frac{2 \frac{\lambda_B \rho_B}{\lambda_A \rho_A}}{1 + \frac{\lambda_B \rho_B}{\lambda_A \rho_A}} \right)^{1/2} \quad (68)$$

Si ambos componentes cumplen la ley Wiedemann – Franz , $\lambda_B \rho_B$ sería igual a $\lambda_A \rho_A$ y n_{opt} sería igual a 1. Babin discutió el caso en el que un material es un semiconductor y B es un metal. Luego, el material B satisface la ley Wiedemann - Franz, pero la conductividad térmica sería más grande para el material A. Sin embargo, si A es un buen material termoeléctrico, la conductividad del enrejado sería pequeña y la conductividad térmica total sera mayor que el valor de Wiedemann – Franz por un factor relativamente pequeño. Por ejemplo, en una aleación de bismuto – telururo, este factor podría ser más de 4. En este caso n_{opt} podría estar cerca de 0.6. En términos generales, parece que es probable que sea satisfactorio utilizar capas de espesor aproximadamente iguales.

5.3 Materiales para Termoelementos transversales

La primera demostración de conversiones de energía termoeléctrica transversal fue reportada por Korolyuk. El uso la anisotropía del coeficiente de Seebeck en un monocristal de antimoniuro de cadmio. Sin embargo, el desempeño fue pobre, como sería para cualquier otro material monocristalino. Mejores resultados fueron obtenidos por Gudkin que hizo una multicapa compuesta de bismuto – Telururo de antimonio y bismuto. Estos autores alcanzaron una cifra de mérito Z_ϕ de $0,85 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$ observada con una refrigeración de 23° , por debajo de la temperatura usando el efecto transversal Peltier en una barra rectangular en donde el ángulo ϕ era igual a 60° . Una muestra trapezoidal con una proporción de 10:1 entre las anchuras de la caras frías y calientes, actuando como una cascada, produjo una diferencia de temperatura máxima de 35° . Recientemente, Kyarad y Lengfellner han obtenido enfriamiento a través de 22° utilizando una estructura de múltiples capas compuesta de plomo y Telururo de bismuto. Kyarad y Lengfellner produjeron sus compuestos por apilación de las placas de plomo y Bi_2Te_3 tipo n de $10 \times 20 \text{mm}^2$ de sección. Las pilas se calientan en argón a 320°C bajo presión. Las capas de Telururo de bismuto fueron de 1mm de espesor mientras que se realizaron experimentos con diferentes espesores del componente principal. La anisotropía observada del coeficiente de Seebeck se muestra en la figura 5.3, donde la curva representa la variación con el cociente n. Kyarad y Lengfellner han optado por un cociente n igual a 1 y adoptaron una inclinación con un ángulo de 25° en muestras de corte de su apilamiento. Normalmente, la longitud de una muestra fue de 20mm, su espesor 10mm y su anchura 2 mm. La figura 5.4 muestra una gráfica de la diferencia de temperatura contra corriente para dicha muestra. Idealmente, los dos materiales que se utilizan en un termoelemento transversal sintético deben tener una alta cifra de mérito cuando se usan juntos en un termopar convencional. También deberían tener valores muy diferentes para la conductividad eléctrica y térmica de $\sigma_A \lambda_A \gg \sigma_B \lambda_B$ para que la condición por lo menos, pueda ser abordada.

Por desgracia, en la mayoría de termopares con altas figuras de mérito, las ramas negativas y positivas tienen conductividades térmicas y eléctricas similares. Esa

es la razón, por qué Gudkin ey Kyarad y Lengfellner eligieron un semimetal o metal en lugar de un semiconductor como el segundo componente de sus compuestos

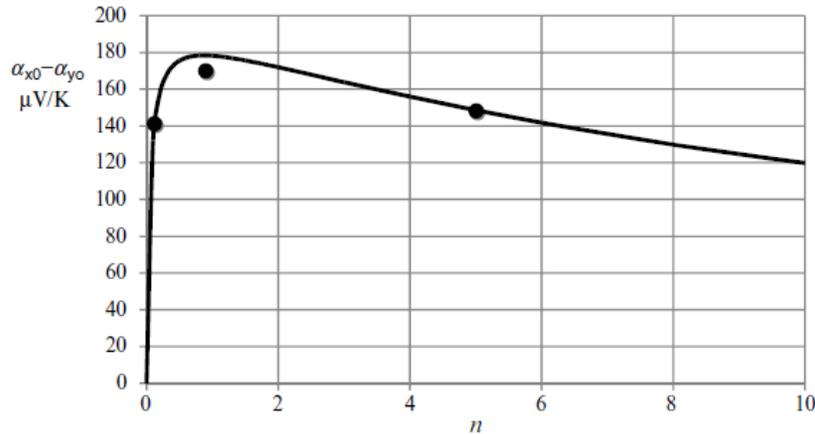


Fig. 5.3 compuesto $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Pb}$ Coeficiente de anisotropía de Seebeck contra relación de espesor n . La curva es la variación teórica y los puntos son los datos experimentales de Kyarad y Lengfellner.

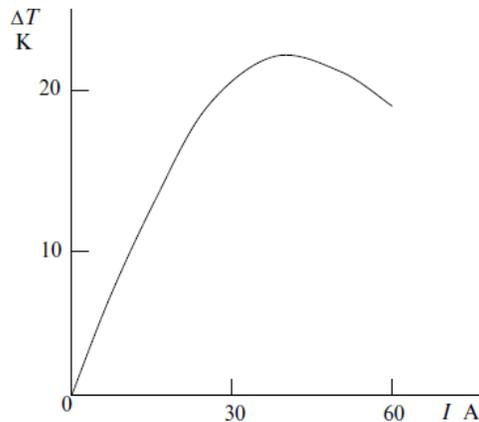


Figura 5.4 diferencia de temperatura producida por el efecto Peltier transversal de un compuesto $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Pb}$. El disipador de calor se mantuvo en 295 K. observaciones de Kyarad y Lengfellner.

Hay algunos pasos generales que pueden adoptarse para sacar lo mejor de la situación. Por lo tanto, si uno opta por una combinación de semiconductor – metal, por lo menos un metal que tiene un gran coeficiente de Seebeck de signo opuesto a la de los semiconductores, puede ser seleccionado. Como veremos más adelante, el espacio estrecho de los semiconductores que tienen coeficientes de Seebeck de $\pm 100 \mu\text{VK}^{-1}$ con un alto factor de potencia puede ser usado en combinación con un material termoeléctrico convencional para composiciones con una alta figura transversal de mérito. Probablemente se podría mejorar los

resultados de Gudkin. Mediante el uso de bismuto monocristal orientado con el eje trigonal en el plano de las capas. En este sentido, el coeficiente de Seebeck de bismuto en 300K es $-105 \mu\text{VK}^{-1}$ y la figura de mérito de un par longitudinal con una aleación de bismuto – Teluro de tipo p puede ser casi tan grande como la de una pareja hecha totalmente de aleaciones de bismuto de telurio. La condición $\sigma_A \lambda_A \gg \sigma_B \lambda_B$ que no está satisfecho, pero la proporción de $\sigma_A \lambda_A / \sigma_B \lambda_B$ podría mejorarse mediante el uso de una aleación de bismuto – telurio sinterizado en lugar de material cristalino alineados. Recientemente se ha sugerido que uno podría obtener $\sigma_A \lambda_A \gg \sigma_B \lambda_B$ para un par de Buenos semiconductores termoeléctricos haciendo uno de los materiales porosos o, quizás, discontinua de alguna otra manera. En principio, la conductividad térmica y eléctrica debe ser menos en un material poroso, pero su proporción sigue siendo los mismos. Hay algunos pasos generales que pueden adoptarse para sacar lo mejor de la situación. Por lo tanto, si uno opta por una combinación de semiconductor – metal, por lo menos un metal que tiene un razonablemente gran coeficiente de Seebeck de signo opuesto a la de los semiconductores puede ser seleccionado. Como veremos más adelante, el estrecho espacio de los semiconductores que tienen coeficientes de Seebeck de 100V/K con un alto factor de potencia puede ser usado en combinación con un material termoeléctrico convencional con una alta figura transversal de mérito. Probablemente se podría mejorar los resultados de Gudkin . Mediante el uso de bismuto monocristal orientado con el eje trigonal en el plano de las capas. En este sentido, el coeficiente de Seebeck de bismuto en 300K es 105V/K y la figura de mérito de una pareja longitudinal con una aleación de bismuto – Teluro de tipo p puede ser casi tan grande como la de una pareja hecha totalmente de aleaciones de bismuto, telurio. La condición $A=B$ podría mejorarse mediante el uso de una aleación de bismuto – telurio sinterizado en lugar del material cristalino alineado. Recientemente se ha sugerido que uno podría ser capaz de obtener A, B para un par de Buenos semiconductores termoeléctricos haciendo uno de los materiales porosos o, quizás, discontinua de alguna otra manera. El semiconductor de tipo n $\text{Bi}_2(\text{Te} - \text{Se})_3$ tiene su cifra más alta de mérito cuando se orienta con corriente perpendicular al eje trigonal, pero la orientación no es un importante factor para el tipo p. $\text{Te}_3(\text{Bi} - \text{Sb})_2$. Así, un termopar hecho de material de tipo p sinterizado y alineado de material tipo n tiene un valor de ZT igual a 0,85. Un termoelemento transversal sintético hecho de muestras totalmente densas de estos materiales tendría una muy pequeña figura de mérito Z_ϕ , pero un valor superior a 0.7 se obtendría si la porosidad del componente sinterizado sería como reducir su conductividad, por un factor de 20. La figura 5.5 muestra cómo la Figura transversal de mérito de un compuesto alineado $\text{Bi}_2(\text{Te} - \text{Se})_3$ y sinterizado. $(\text{Bi} - \text{Sb})_2 \text{Te}_3$, varía con la porosidad (factor p), del último componente. El factor de la porosidad se define como el

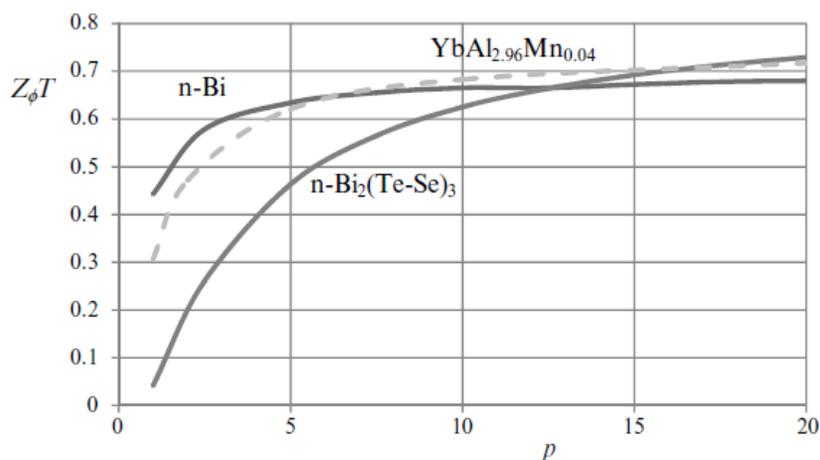


Figura 5.5 Figura transversal óptima adimensional de mérito contra el factor de porosidad del componente positivo. Te_3 ($\text{Bi} - \text{Sb}$)₂. Para las curvas de sólidos, el componente negativo es cualquier $\text{Bi}_2(\text{Te} - \text{Se})_3$ o Bi. Para la curva, el componente negativo es $\text{YbAl}_{2.96}\text{Mn}_{0.04}$.

Material	Coef. Seebeck $\mu\text{V K}^{-1}$	Resistividad Eléctrica $\mu\Omega\text{ m}$	Conductividad térmica W/m K
Orientación Tipo N $\text{Bi}_2(\text{Te}-\text{Se})_3$	-180	7.2	1.51
Sinterizado Tipo P $(\text{Bi}-\text{Sb})_2\text{Te}_3^*$	245	17.5	1.25
Bismuto Tipo N Paralelo a las Capas	-105	1.1	13.0
Bismuto Tipo n perpendicular a las capas	-50	1.3	6.0
$\text{YbAl}_{2.96}\text{Mn}_{0.04}$	-90	1.3	3.1

Tabla 5.1 propiedades de los materiales que se utilizan en termoelementos sintéticos transversales.

Cociente de la conductividad del material completamente denso por el material poroso. En moderadas porosidades, uno debe ser capaz de relacionar la densidad ρ , mediante la fórmula dada por Kingery. Como alternativa al hacer uso de la porosidad para disminuir la conductividad eficaz, uno podría hacer uso de uno de los componentes en forma de líneas muy espaciadas y delgadas. En los cálculos en que se basa la gráfica 5.5, ha sido seleccionado el material tipo p con un mayor coeficiente de Seebeck con un grado óptimo en un par convencional, mientras que el material tipo n tiene un óptimo coeficiente seebeck más bajo. Los valores para los parámetros de los dos materiales termoeléctricos están en la tabla 5.1. La figura 5.5 muestra una cifra adimensional transversal de mérito sobre 0.7. Podría lograrse con un factor de porosidad para el componente de tipo p superior

a 15. Una porosidad tan alta será difícil de alcanzar en la práctica, para ello se ha realizado un cálculo similar para un compuesto en el cual el componente negativo es solo bismuto de cristal alineado con el eje c paralelo a las capas. Las propiedades del bismuto en las dos direcciones también están incluidas en la tabla 5.1. El bismuto tiene una ventaja sobre el $\text{Bi}_2 \cdot (\text{Te} - \text{Se})_3$, como el componente tipo n en un termoelemento transversal desde su relación de conductividad térmica de resistividad eléctrica es un poco mayor. Así, como se muestra en la Fig. 5.5, el valor de Z_ϕ es mayor para el $\text{Te}_3 (\text{Bi} - \text{Sb})_2$ que $(\text{Bi} - \text{Sb})_2 \text{Te}_3 - \text{Bi}_2 \cdot (\text{Te} - \text{Se})_3$ con factores de porosidad de menos de 12 para el componente tipo p. Por lo que se infiere cambiar el efecto del ángulo y la relación de los espesores de las capas para el $\text{Te}_3 \text{Bi} - \text{Sb}/2 - \text{Bi}_2 \cdot \text{Te} - \text{Se}/3$. La figura 5.6 muestra cómo $Z_\phi T$ varía respecto a ϕ cuando $n=1,1$ y $p=20$, mientras que en la figura 5.7, $Z_\phi T$ se enfrenta a n cuando $\phi=18.4^\circ$. Para el Compuesto $\text{Te}_3 - \text{Bi} (\text{Bi} - \text{Sb})_2$, el valor de n permanece en el punto 1.3 para todos.

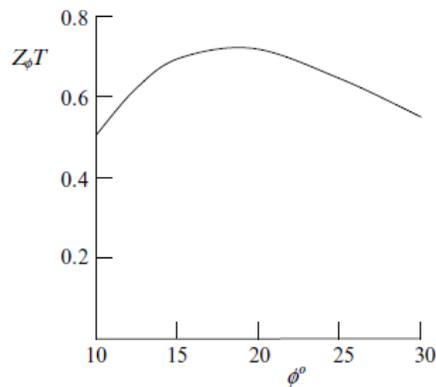


Figura 5.6 figura de mérito transversal contra el ángulo de orientación de las capas en un compuesto $(\text{Bi} - \text{Sb})_2 \text{Te}_3 - \text{Bi}_2 \cdot (\text{Te} - \text{Se})_3$. El cociente $n=1.1$ y el factor de porosidad para el componente tipo p es 20.

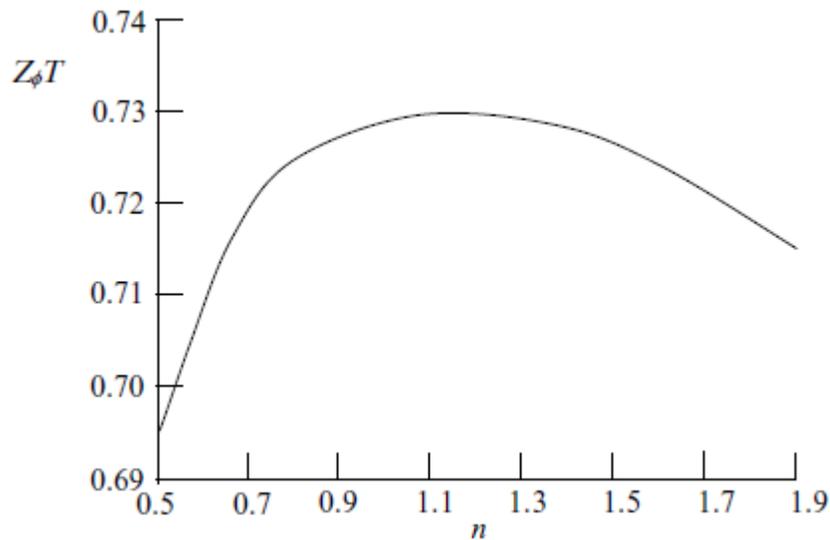


Figura 5.7 figura transversal de mérito adimensional contra relación de espesor, de la capa para compuestos $(\text{Bi} - \text{Sb})_2$, $\text{Te}_3 - \text{Bi}_2 \cdot (\text{Te} - \text{Se})_3$.

El factor de porosidad para el componente tipo p es 20 y el ángulo de orientación de las capas es de $18,4^\circ$, pero el valor óptimo para ϕ varía de 40° cuando $\rho = 1$, a través de 30° cuando $\rho = 5$, a menos que tome el valor de 20° cuando $\rho = 20$. Recientemente ha sido reportado que $\text{YbAl}_{2,96}\text{Mn}_{0,04}$ tiene un coeficiente de Seebeck de $-90 \mu\text{VK}^{-1}$, una resistencia de $31.3 \mu\Omega \text{ m}$ y una conductividad térmica de $3.1 \text{ Wm}^{-1} \mu\text{K}^{-1}$. Esto da un valor razonablemente alto para zT de 0,6 a 300K. Util como un componente de un termoelemento sintético transversal. El valor de Z_ϕ para un compuesto completamente sinterizado tipo p denso como el telururo de bismuto y $\text{YbAl}_{2,96}\text{Mn}_{0,04}$ no es tan bueno como para uno en que el bismuto es utilizado, probablemente porque puede tomar ventaja de la anisotropía de este último. Sin embargo, como se muestra en la curva expuesta en la figura 5.5, hay una gama del factor de porosidad para que el telururo de bismuto y $\text{YbAl}_{2,96}\text{Mn}_{0,04}$ sea la mejor combinación. Incluso para menor porosidad del componente positivo, puede ser preferible para utilizar $\text{YbAl}_{2,96}\text{Mn}_{0,04}$ como el componente negativo puesto que no necesita ser mono cristalino. La aleación tiene una estructura cúbica y se puede preparar por sinterización.

5.4 Configuraciones alternativas

La construcción de termoelementos sintéticos transversales, presenta problemas que no se encuentran en módulos termoelectricos ordinarios. Por lo tanto, se ha dado a otros arreglos para producir los dispositivos transversales. Los investigadores en el pasado siempre parecen haber hecho uso del principio de múltiples capas para obtener una gran anisotropía del coeficiente Seebeck. Sin embargo, deben obtenerse los mismos resultados si uno de los componentes es en forma de cables que sean incrustados en el segundo componente. Al principio puede ser entendido con referencia a la figura 5.8, que muestra una sola varilla incrustada en una barra de material. Supóngase la barra y_0 de resistencia R y coeficientes Seebeck α_R y α_B respectivamente con una diferencia grande entre dichos coeficientes.

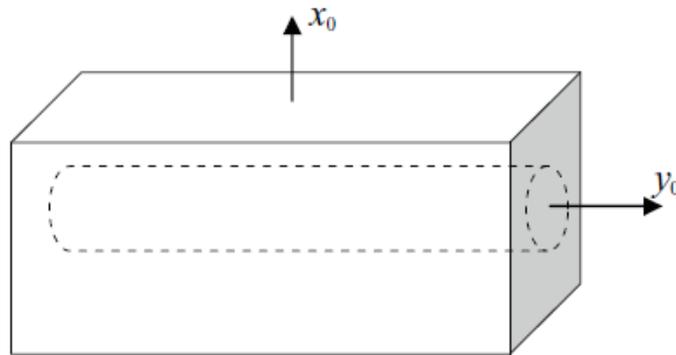


Fig. 5.8 realización de varilla incrustados en otro conductor

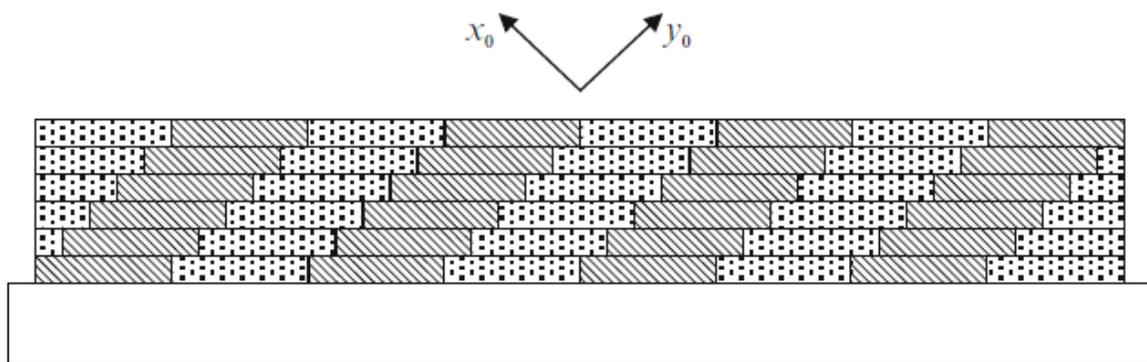


Fig 5.9 representación esquemática de un termoelemento sintético anisotrópico, producido por thinfilm technology. La máscara se desplaza en pasos regulares cuando se deposita cada capa media.

La máscara se desplaza en pasos regulares y se deposita cada media capa una sobre la otra. Además, la conductividad eléctrica y térmica de la barra son mucho mayores que los de la varilla. Luego, en la dirección x_0 , el coeficiente de Seebeck será igual a α_B desde la varilla sólo formará una superficie interna isotérmica y equipotencial. En la dirección de y_0 , las conductividades eléctricas y térmicas serán controladas por la varilla y el coeficiente de Seebeck será igual a α_R . En la barra no es necesario extender el compuesto desde un extremo al otro. La inclusión de más barras cortas alineadas dentro de la matriz puede resultar en una anisotropía substancial del coeficiente de Seebeck. Si estas barras tomaran la forma de nano hilos, entonces se podría, quizá, combinar la figura de mérito resultante de una nano estructura con las ventajas prácticas de los efectos termoeléctricos transversales. Aunque el arreglo de varillas o cables en una matriz puede ser más simple para la fabricación de una estructura laminar, todavía existe la necesidad de cortar una sección en el mejor ángulo. Un dispositivo transversal sintético con la orientación apropiada podría hacerse en un solo proceso usando tecnología de película delgada. El principio es ilustrado en la Fig. 5.9.

Conclusiones

En el desarrollo de este seminario se estudiaron los fundamentos físicos de la termoelectricidad. Ante el evidente aumento en el consumo energético mundial, se hace necesario buscar nuevas fuentes, que sean ambiental y económicamente viables y en este sentido la energía por termoelectricidad se convierte en una excelente opción al pensar en mejores rendimientos térmicos y eléctricos, sobre todo en la refrigeración por células de estado sólido, tema que continúa en avance investigativo, con el propósito de alcanzar coeficientes de mérito ZT mayores a 3, de manera que se pueda competir sólidamente con mecanismos convencionales de refrigeración y calefacción.

Las compañías de automóviles alemanas Volkswagen y BMW han desarrollado generadores termoeléctricos (GTE) que recuperan el gasto de calor de una máquina de combustión.

Según un informe del Profesor Rowe de la Universidad de Wales en la Sociedad Termoeléctrica Internacional, Volkswagen afirma obtener 600W de salida del GTE en condición de conducción en autopista. La electricidad producida por el GTE es cerca del 30% de la electricidad requerida por el auto, obteniendo una carga mecánica reducida (alternador) y una reducción en el consumo de combustible de más del 5%.

BMW y DLR (Centro aeroespacial alemán) han desarrollado también un generador termoeléctrico impulsado por el tubo de escape que alcanza un máximo de 200 W y se ha usado exitosamente por más de 12000 km en carretera.

Sondas espaciales en el exterior del sistema solar hacen uso del efecto en generadores termoeléctricos radio-isótopos para generación de electricidad.

Un refrigerador Peltier es una bomba térmica activa que transfiere calor desde una parte del dispositivo hacia la otra. Los sistemas de enfriamiento de las cámaras CCD funcionan con base en el efecto Peltier. Así como en el termociclador usado en Biología Molecular para realizar la PCR.

En la actualidad, los mejores materiales utilizados en la construcción de dispositivos de conversión termoeléctrica, poseen factores de mérito ZT de valor cercano a 1. Este valor nos indica investigar aún más sobre rendimientos de conversión rentables que permiten aplicaciones destinadas a gran público. Por ejemplo, harían falta materiales con un $ZT=3$ para poder desarrollar un refrigerador doméstico competitivo. En el caso de sistemas de generación de electricidad (que podrían utilizarse, por ejemplo, en los tubos de escape de coches o camiones, o

sobre microprocesadores, es posible aumentar la rentabilidad de los sistemas de dos formas: incrementando significativamente sus rendimientos (consiguiendo por ejemplo un $ZT > 2$), o bien reduciendo sus costes de producción.

Mayores valores de ZT , indican mayor eficiencia termodinámica, según ciertas disposiciones, en particular el requisito de que los dos materiales del par tengan valores Z similares. ZT es por lo tanto una figura muy conveniente para comparar la eficiencia del potencial de dispositivos usando materiales diferentes. Valores de $ZT=1$ se consideran buenos, y valores de al menos en el rango de 3-4 se consideran esenciales para que la termoelectricidad compita con la generación mecánica y refrigeración en eficiencia. Hasta ahora, los mejores valores ZT reportados están en el rango de 2-3. Mucha de la investigación en materiales termoeléctricos se enfoca en aumentar el coeficiente Seebeck y reducir la conductividad térmica, especialmente manipulando la nanoestructura de los materiales.

Referencias

L.I. Anatyчук, *Physics of Thermoelectricity* (Institute of Thermoelectricity, Kiev, 1998).

L.I. Anatyчук, *Thermoelectric Power Convertors* (Institute of Thermoelectricity, Kiev, 2005).

Albert C. Beer, *Galvanomagnetic Effects in Semiconductors* (Academic, New York, 1963)

C.M. Bhandari, D.M. Rowe, *Thermal Conduction in Semiconductors* (Wiley Eastern, New Delhi, 1988) J.S. Blakemore, *Solid State Physics*, 2nd edn. Cambridge University Press, Cambridge, 1985).

J.R. Drabble, H.J. Goldsmid, *Thermal Conduction in Semiconductors* (Pergamon, Oxford, 1961).

H.J. Goldsmid, *Applications of Thermoelectricity* (Methuen, London, 1960).

H.J. Goldsmid, *Thermoelectric Refrigeration* (Plenum, New York, 1964).

H.J. Goldsmid, *Electronic Refrigeration* (Pion, London, 1986).

T.C. Harman, J.M. Honig, *Thermoelectric and Thermomagnetic Effects and Applications* (McGraw-Hill, New York, 1967).

A.F. Ioffe, *Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling* (Infosearch, London, (1957).

A.F. Ioffe, *Physics of Semiconductors* (Infosearch, London, 1960).

C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, 5th edn. (Wiley, New York, 1976).

John P. McKelvey, *Solid State and Semiconductor Physics* (Harper and Row, New York, 1966).

B.R. Nag, *Electron Transport in Compound Semiconductors* (Springer, Berlin, 1980).

G.S. Nolas, J. Sharp, H.J. Goldsmid, *Thermoelectrics. Basic Principles and New Materials Developments* (Springer, Berlin, 2001).

E.H. Putley, *The Hall Effect and Related Phenomena* (Butterworths, London, 1960).