



MASTER EN AUTOMOCIÓN

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

CLIMATIZACIÓN Y CALEFACCIÓN EN EL VEHÍCULO ELÉCTRICO MEDIANTE SISTEMAS TERMOELÉCTRICOS

Autor: D. Juan-Ramón Muñoz Rico
Tutor: Dr. D. Francisco Tinaut Fluixá

Valladolid, Junio de 2012

Escuela Ingenierías Industriales

Depto. Ing^a Energética y Fluidomecánica

Paseo del Cauce s/n

47011 Valladolid
(España)



Fundación Cidaut

Parque Tecnológico de Boecillo, 209

47151 Boecillo (Valladolid)

España



RESUMEN

En este Trabajo de Fin de Máster se analiza la posibilidad de **sustituir la tecnología actual de frío por compresión** empleada habitualmente en automoción para la refrigeración del habitáculo por **sistemas termoeléctricos**.

Se hace una primera aproximación al **estado actual del arte** (tecnología de frío por compresión), con la que se evalúan por un lado las **necesidades energéticas** para la climatización y calefacción de un habitáculo de un vehículo turismo de tipo medio y, por otro, el **Coefficiente de Operación** (Coefficient Of Performance, COP) del sistema.

En lo que a las necesidades energéticas se refiere, éstas se establecen como **exigencias del usuario**, y son las que habrán de mantenerse en el vehículo eléctrico. A partir de ellas, se analiza la posibilidad de su satisfacción mediante otros sistemas de refrigeración y/o bomba de calor. Aunque se hace referencia a otras posibilidades disponibles con la tecnología actual, el trabajo se centra en la **climatización y calefacción mediante sistemas termoeléctricos**.

En cuanto al COP, éste se busca porque se pretende tener una referencia desde el punto de vista Termodinámico de la **distancia a la que se encuentra la tecnología de los semiconductores** y la termoelectricidad para su implantación en la climatización y calefacción de automóviles, en sustitución de los sistemas de frío por compresión (para frío) e intercambiadores de calor a partir del fluido de refrigeración de motor (para calor).

Se introducen **descripciones** de los fenómenos termoeléctricos Joule, Seebeck y Peltier, así como de sus posibles aplicaciones en climatización y calefacción, centrando el estudio en el **efecto Peltier** como el fundamento del funcionamiento de los sistemas termoeléctricos objeto de estudio por la posibilidad que ofrecen de producción tanto de calor como de frío.

Así, para los sistemas termoeléctricos se hace una **descripción de su comportamiento electrónico** para, a partir de ahí, establecer los parámetros que caracterizan su funcionamiento, relacionándolos con los aspectos Termodinámicos que involucran, especialmente con el Coeficiente de Operación (Coefficient Of Performance, COP) y las potencias que son capaces de intercambiar.

Se **comparan los balances energéticos y los COP** en los sistemas de frío por compresión y en los sistemas termoeléctricos, resultando éstos últimos en desventaja en cuanto al COP pero situándose ya a un nivel competitivo en cuanto a las potencias intercambiadas ya sea en forma de calor o frío.

Se presenta una **opción comercial** que ofrece como ventaja el **tiempo en alcanzar en el habitáculo la temperatura de confort**, notablemente menor en los sistemas termoeléctricos que en los sistemas de frío por compresión, lo que puede entenderse como una introducción en el mercado con vista a una implantación futura del sistema.

ENGLISH TITLE

AIR CONDITIONING AND HEATING WITH THERMOELECTRIC SYSTEMS IN ELECTRIC VEHICLE.

ABSTRACT

In this Final Master Work the possibility of **replacing for thermoelectric Systems instead the current technology of cold compression** usually used for automotive interior cooling is explored.

A first approximation to the **current state of the art** (cold compression technology) is made, which assesses the one hand the **energy needed** for cooling and heating of a cabin of a private vehicle average and, the other, the system's **coefficient of performance** (Coefficient of Performance, COP).

As far as energy requirements are concerned, they are set as **user requirements**, and are to be kept in electric vehicles. From them, we analyze the possibility of their satisfaction with other cooling systems and / or heat pump. Although reference to other possibilities available with current technology is made, the paper focuses on the **cooling and heating by thermoelectric systems**.

As for the COP, it is looking for is to have a reference from the thermodynamic point of view of the **distance that the technology of semiconductors and thermoelectrics is** for implementation in the automotive air conditioning and heating, replacing systems by cold compression (for cooling) and heat exchanger from the engine cooling fluid (for heating).

Descriptions about thermoelectric phenomenon Joule, Seebeck and Peltier are introduced, and their potential applications in air conditioning and heating. The study focused on the **Peltier effect** as the basis of the performance of thermoelectric Systems, studied by the possibility offered in production both heat as cold.

Thus, a **description of their electronic behavior** is made for thermoelectric systems for, from there, to establish the parameters that characterize its performance, relating to the thermodynamic aspects involving, in particular the coefficient of performance (COP) and the powers that they are able to exchange.

The energy **balances and the COP** in compression refrigeration systems and thermoelectric Systems **are compared**, resulting the last at a disadvantage with regard to COP, but standing and at a competitive level in terms of exchanged powers either as heat or cold.

A commercial is presented. It offers as an option of advantage the **time to reach temperature in the passenger comfort**, substantially less in thermoelectric Systems than in compression refrigeration systems, what can be understood as an introduction on the market with a view to future implementation of the system..

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, a la que ya debo tanto tiempo...

A mis amigos, que de vez en cuando me llenan de combustible y puedo seguir.

A mis compañeros, que cubrieron mi ausencia y nada se notó.

A mis alumnos, que me enseñan todos los días.

A mis profesores, pero sólo a los que me enseñaron.

A Francisco, por su dirección exhaustiva, meticulosa y siempre a tiempo.

A Ángel, mi maestro, aunque sé que a él no le guste estar aquí (que se aguante).

A mi padre.

NOMENCLATURA

A_n : Sección transversal del semiconductor tipo N.

A_p : Sección transversal del semiconductor tipo P.

C_E : Coste de la energía.

C_T : Coste total.

C_f : Coste de funcionamiento.

C_i : Coste de instalación.

COP: Coefficient Of Performance (traducido incorrecta, pero deliberadamente, como Coeficiente de OPeración).

E: Energía.

FC: Sistema de Frío por Compresión.

h: Entalpía específica.

I: Intensidad eléctrica.

K_n : Coeficiente de conductividad térmica del semiconductor tipo n.

k_p : Coeficiente de conductividad térmica del semiconductor tipo p.

L_n : Longitud del semiconductor tipo N.

L_p : Longitud del semiconductor tipo P.

\dot{m}_R : Flujo másico de refrigerante.

R: Resistencia eléctrica.

R_L : Resistencia eléctrica de carga externa.

R_n : Resistencia eléctrica del semiconductor tipo n.

R_p : Resistencia eléctrica del semiconductor tipo p.

Q_C : Calor intercambiado con fuente caliente.

\dot{Q} : Calor intercambiado por unidad de tiempo.

\dot{Q}_C : Calor intercambiado con fuente caliente por unidad de tiempo.

Q_F : Calor intercambiado con fuente fría.

\dot{Q}_F : Calor intercambiado con fuente fría por unidad de tiempo.

\dot{Q}_{Jp} : Calor intercambiado por unidad de tiempo debido al efecto Joule en el semiconductor tipo p.

\dot{Q}_{Jn} : Calor intercambiado por unidad de tiempo debido al efecto Joule en el semiconductor tipo n.

\dot{Q}_P : Calor intercambiado por unidad de tiempo en un sistema termoeléctrico Peltier.

s: Entropía específica.

SE: Sistema Termoeléctrico.

T: Temperatura absoluta (en K)..

T_C : Temperatura caliente (en K).

T_F : Temperatura fría (en K).

t_F : tiempo de funcionamiento (en h).

V : Tensión eléctrica.

W : Trabajo intercambiado.

\dot{W} : Potencia intercambiada.

\dot{W}_C : Potencia de compresor.

x : Distancia.

Z : Figura de mérito.

α : Potencia termoeléctrica.

α_n : Potencia termoeléctrica del semiconductor tipo n.

α_p : Potencia termoeléctrica del semiconductor tipo p.

η : Rendimiento.

η_C : Rendimiento isentrópico de compresor.

ρ_n : Resistividad eléctrica del semiconductor tipo n.

ρ_p : Resistividad eléctrica del semiconductor tipo p.

π_{AB} : Coeficiente de Peltier.

ÍNDICE.

1.	Introducción	1
1.1	Antecedentes.....	1
1.1.1	Evolución de los sistemas de climatización y calefacción en vehículos.....	1
1.1.2	Sistemas termoeléctricos	3
	El efecto Joule.....	4
	El efecto Seebeck.....	5
	El efecto Peltier.....	5
	El efecto Thomson.....	6
1.1.3	Vehículos eléctricos.....	7
1.2	Objetivos.....	9
1.3	Planteamiento del trabajo.....	9
2.	Situación y estado actual del arte.....	11
2.1	El ciclo de frío por compresión: situación actual	11
2.2	Sistemas termoeléctricos: situación actual	13
	El efecto Joule.....	13
	El efecto Seebeck	14
	El efecto Peltier	15
	Materiales tipo N.....	16
	Materiales tipo P.....	16
	Dispositivo termoeléctrico elemental	16
2.3	Refrigeración termoeléctrica.....	19
2.4	Potencia de refrigeración termoeléctrica	21
2.5	Optimización geométrica de la figura de mérito en refrigeración termoeléctrica	24
2.6	Coeficiente de operación en refrigeración termoeléctrica	27
2.7	Coeficiente de operación en refrigeración en cascada	28
2.8	Generación termoeléctrica	31
3.	Evaluación de un sistema convencional de refrigeración por compresión en un vehículo.....	33
3.1	Coeficiente de operación en refrigeración por compresión.....	33
3.2	Análisis de necesidades a partir de la tecnología actual.....	35
4.	Evaluación de un sistema termoeléctrico para climatización en un vehículo.....	37
4.1	Comparación entre coeficientes de operación y atención a necesidades energéticas con sistemas termoeléctricos	37
4.2	Utilización actual de los sistemas termoeléctricos en HVAC en automóviles	38
4.3	Generación termoeléctrica	41
5.	Estudio comparativo entre sistemas termoeléctricos y convencionales	43
5.1	Sistemas termoeléctricos en refrigeración	43

5.2	Sistemas termoeléctricos en calefacción	47
6.	Conclusiones	53
6.1	Resumen de resultados.....	53
6.2	Principales aportaciones	53
6.3	Sugerencias para trabajos futuros	54
	Referencias.....	57
	Libros	57
	Software.....	57
	Tech Papers	58
	Webs	58

1 INTRODUCCIÓN.

1.1 *Antecedentes.*

1.1.1 Evolución de los Sistemas de Climatización y Calefacción en Vehículos.

Aunque la profundización en la evolución histórica de los sistemas de climatización y calefacción en automóviles no sea el objeto de este Trabajo de Fin de Máster, se estima que sí cabe hacer una pequeña **reseña de la trayectoria seguida por esta tecnología en los últimos años**, ya que esta aproximación puede ayudar al lector tanto a comprender su situación actual como a extrapolar la tendencia futura.

Sin duda, todo parece empezar cuando los carruajes tirados por animales son techados para protegerse de las inclemencias atmosféricas y de la intemperie, algo muy empleado en España y en los países europeos por la nobleza y la aristocracia, y también, aunque con menos ostentación de riqueza, en la época de la colonización de lo que hoy en día conocemos como USA.

En vehículos automóviles, el **primer calentador** fue patentado por el canadiense **Thomas Ahearn** en el Queen's Privy Council, en Canadá. Se trataba de una **resistencia eléctrica** que comenzó a venderse en 1890 pero que no tuvo éxito en el mercado.



Figura 1.
Thomas Ahearn, 24 de Junio de 1855 – 28 de June de 1938.

El diseño de Ahearn sucumbió al de su contemporáneo **Clark Thomas Jefferson**, que propuso un **sistema de calefacción a carbón bajo el piso del vehículo**, que mantenía así los pies calientes. Fue, sin duda, un precursor de lo que hoy en día podríamos considerar como un suelo radiante en un vehículo. El sistema violaba la normativa sobre humo de New Hampshire, lo que le obligó a construir una planta en Aberdeen, Illinois, al oeste de Chicago. No obstante, acabó fracasando por las frecuentes **fugas de gases residuales de la combustión hacia el habitáculo**.



Figura 2.
Ford A.

En 1929, **Henry Ford** desarrolla un sistema, que incorpora a su modelo A, por el que se **introduce en el habitáculo el aire caliente procedente del motor**. Su éxito fue limitado por el tiempo que empleaba en calentar el habitáculo.

En el comienzo de 1930 se produce un gran avance en la tecnología de la calefacción para automóviles, gracias a la Compañía **Stewart Warner** que aún hoy existe y cuya página Web se puede visitar en la dirección <http://www.stewart-warner.com/>. La compañía proponía **quemar combustible de modo que los gases calientes se hiciesen pasar por un intercambiador de calor**, que sería el encargado de aportar el calor necesario para la calefacción del habitáculo. **Volkswagen** adoptó esta solución en la calefacción del Beetle, en 1962, sin éxito alguno por el consumo adicional del combustible que suponía y porque, nuevamente, tendían a escaparse gases tóxicos hacia el habitáculo.

Mientras estos calentadores gozaban de una gran popularidad en sus primeros momentos, iba tomando fuerza un nuevo diseño debido a **Nash Motors** basado en la **reorientación del refrigerante caliente del motor hacia un intercambiador por el que se hacía pasar aire propulsado con un ventilador**. En 1930, **General Motors** adoptó esta solución que es la que hoy en día se sigue empleando como diseño básico para la calefacción del habitáculo.

En 1937, **Nash Motors** empleó **filtros** muy finos en la entrada de aire y habilitó en los paneles de operación del vehículo la **capacidad para que el conductor pudiese regular el flujo hacia el interior**. En 1939, Nash añadió un **termostato** a su sistema, convirtiéndose en lo que se podría llamar el primer sistema de control de calefacción en un automóvil. En ese mismo año, **General Motors** ofrecía **calefacción en los asientos** de sus vehículos de alta gama.

La historia del aire acondicionado en vehículos comenzó en 1939 con la flota de vehículos de **Packard Motor Car Company**. Una unidad de gran tamaño y sobredimensionada producía **aire frío**. Éste entraba en el habitáculo a través de orificios fijos. La unidad ocupaba más de medio maletero y el principal problema que impidió su éxito radicó en las **dificultades** que se encontraron para **controlar la temperatura o apagar la unidad desde el interior del vehículo**. Cuando hacía demasiado frío, el conductor tenía que detenerse, abrir el maletero y apagar manualmente la unidad. Contribuyó a su fracaso el **altísimo sobrecoste** que añadía la unidad (274 \$ de la época, lo que ahora vendrían a suponer unos 5000 €). La producción de este modelo terminó en 1941.

La **Segunda Guerra Mundial** supuso un **avance** notable en la tecnología de la calefacción en vehículos, al hacerse necesario proporcionar comodidad a las tropas motorizadas que combatían en condiciones meteorológicas muy adversas.

Al final de la década de los 50 se produjo una **estandarización** de los calentadores por parte de General Motors que permitió que modelos distintos de automóviles pudiesen emplear las mismas piezas, **reduciéndose así notablemente los costes de producción**. Otros fabricantes de todo el mundo no tardaron en seguir por el mismo camino.



Figura 3.
Chrysler Imperial luxury.

En 1953, **Chrysler Corporation** ofrecía **aire acondicionado** en su modelo de Imperial Luxury, como una opción preinstalada de fábrica. La mayoría de los sistemas de la competencia utilizaba un sistema de calefacción separado y un compresor montado en el motor, impulsado por el cigüeñal del motor a través de una correa, con un evaporador en el maletero del coche para suministrar aire frío a través de la repisa trasera y los respiraderos.

En 1954, la Compañía americana **Nash-Kelvinator** montó un sistema que presentó como eficiente, efectivo y asequible en coste, en su modelo Nash Ambassador, que fue elegido modelo del año.



Figura 4.
Nash Ambassador.

La aportación principal del Nash Ambassador fue la **inclusión de un panel en el que integraba completamente calefacción, ventilación y refrigeración**. El aire frío entraba hacia el habitáculo a través de rejillas de ventilación montadas en el tablero. La corporación de Nash-Kelvinator utilizó su experiencia en la refrigeración de automóviles introduciendo un sistema opcional compacto y asequible para sus modelos 1954, que comercializó bajo el nombre de "All-Weather Eye", compuesto por una única **unidad de sistema de calefacción y aire acondicionado**.

El diseño de Nash se convertiría en universal, siendo adoptado en general por la industria del automóvil y **continuando hasta nuestros días**.

Posteriormente, **Cadillac** fue el primer fabricante en implementar un **control de temperatura completamente automático** en sus modelos.

La **crisis energética de los años 70** trajo un renovado interés en el **coche eléctrico**, en el que **no se cuenta con los fluidos calientes** que sí están presentes en los vehículos propulsados con motor de combustión interna. Además, en el balance energético **apenas hay energía residual** en el motor eléctrico, lo que ha venido a traducirse en la **necesidad** de dar un nuevo impulso a la tecnología de la climatización y calefacción en vehículos.

1.1.2 Sistemas Termoeléctricos.

Los materiales termoeléctricos son materiales, habitualmente en estado sólido, que son capaces de transformar energía térmica en eléctrica y viceversa, y cuya combinación de propiedades térmicas, eléctricas y semiconductoras permiten su utilización en la conversión del calor residual directamente en electricidad, o de la electricidad en calor y/o frío, pudiendo utilizarse tanto en generación de energía eléctrica como en calentamiento y/o enfriamiento. Estos materiales **pueden ser competitivos con los sistemas de frío o bomba de calor por compresión de vapor** o en aplicaciones a menor escala como son los asientos de los automóviles, sistemas de visión nocturna y refrigeración de interiores. Un uso más generalizado de la termoelectricidad requiere no sólo **mejorar la eficiencia de conversión energética** intrínseca de los materiales, sino también la aplicación de los últimos los avances en las arquitecturas de los sistemas que controlan su comportamiento. Estos principios se ilustran con algunas aplicaciones probadas del potencial termoeléctrico.

Las necesidades de la sociedad han centrado su atención en tecnologías que puedan **reducir el tamaño del agujero de la capa de ozono, las emisiones de gases de efecto invernadero y la reducción en la utilización de combustibles fósiles**. Los sistemas Termoeléctricos (TE), que son sistemas de semiconductores que pueden transformar directamente electricidad en energía térmica para refrigerar, calentar o recuperar calores residuales y transformarlos directamente en potencia eléctrica, están siendo cada vez más considerados como una alternativa potencial en la reducción de

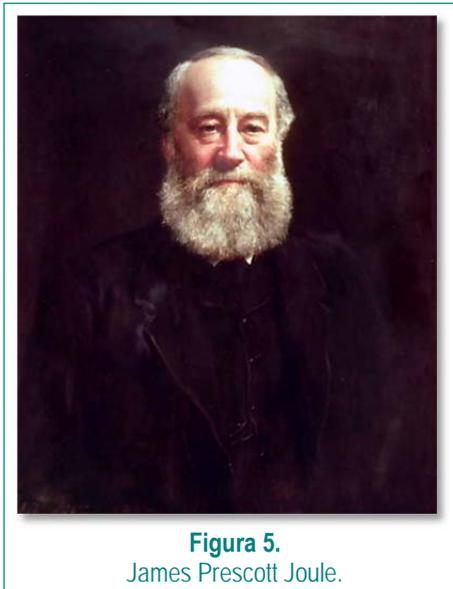
emisiones de CO₂ y gases de efecto invernadero, así como en la utilización de formas limpias de energía.

En los siguientes apartados se **comparan** los **sistemas TE de estado sólido** con los sistemas más empleados en la actualidad para calentamiento, refrigeración y generación de energía eléctrica. Estos **sistemas tradicionales** son similares, en el sentido de que todos emplean un **fluido** de trabajo sometido a transformaciones termodinámicas. En los sistemas TE dicho fluido se "sustituye" por una corriente eléctrica, en tanto que en los sistemas tradicionales empleados en máquinas y motores térmicos los fluidos de trabajo son tanto aire, como vapor y sustitutos de los freones. Con estos sistemas pueden llegar a conseguirse buenos rendimientos o Coeficientes de Operación.

EL EFECTO JOULE.

A finales del siglo XIX **James Prescott Joule** describió lo que en la Bibliografía se puede encontrar como la primera interacción entre un fenómeno térmico y otro eléctrico. Joule observó que **cuando por un conductor se hace circular una corriente eléctrica aquél se calienta**. Dedujo que ese calentamiento era debido a que la materia oponía una cierta **resistencia** al movimiento de los electrones y que ese calentamiento resultaba de la manifestación del **trabajo de rozamiento** que se producía al circular los electrones por dicho conductor eléctrico, de una misma forma parecida a como sucede cuando un fluido circula por un tubo.

En este sentido conviene recordar que en la época se había definido el calor (al que inicialmente se había dado el nombre de "*calórico*") como un "*fluido invisible*" que se movía desde los cuerpos más calientes a los cuerpos más fríos.

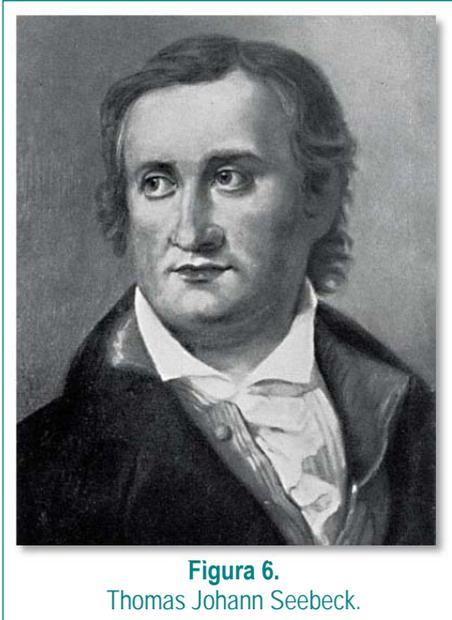


Ese trabajo de rozamiento era el causante del **aumento de temperatura** en el conductor y de ese aumento de temperatura y la **diferencia con la temperatura del ambiente** resultaba el **flujo de calor** desde el conductor que se observaba. James Prescott Joule hizo numerosos trabajos en los que se describía la relación entre calor, trabajo y trabajo de rozamiento que le llevaron al establecimiento de lo que ahora se conoce como *equivalente mecánico del calor* (1 caloría = 4.186 Julios) o *equivalente térmico del trabajo* (1 Julio = 0.24 calorías).

El efecto Joule ha sido el más utilizado a lo largo de la historia de la tecnología reciente. Sin embargo no es el único. El Efecto Joule permite **únicamente** la transformación de **energía eléctrica en trabajo de rozamiento y, por tanto, en calor**. Otros sistemas termoelectricos permiten la transición entre energía eléctrica, calor y frío, en cualquiera de los sentidos posibles.

EL EFECTO SEEBECK.

En 1.821 el Físico alemán **Thomas Johann Seebeck** evidenció la **aparición de una corriente eléctrica** en un circuito formado por **dos conductores distintos soldados por sus extremos**, cuando las uniones se encontraban a **diferentes temperaturas**, al observar que se desviaba la aguja de una brújula ubicada en las proximidades del circuito.



Atribuyó dicha desviación al **campo magnético** que se generaba al circular una corriente eléctrica que cesaba cuando se separaban las uniones soldadas de los conductores de los recipientes a diferentes temperaturas en los que se introducían.

Seebeck demostró que la corriente eléctrica circulante resultaba de una **diferencia de potencial** que dependía de la **naturaleza de los conductores** y de la **diferencia entre las temperaturas** a que se sometían sus uniones.

Aunque las magnitudes de las corrientes eléctricas medidas aún en la actualidad son muy **pequeñas**, ello no ha impedido la aplicación de este efecto profusamente. La más conocida de todas se encuentra en los termómetros llamados **termopares**.

EL EFECTO PELTIER.

El efecto Peltier fue descubierto por el físico francés **Jean Charles Athanase Peltier** en 1.834, quien describió el efecto que tiene lugar cuando una corriente eléctrica circula por la unión de dos metales colocados en serie un circuito eléctrico.

A este efecto se le conoce hoy en día como efecto Peltier y básicamente es contrario al efecto Seebeck. Peltier observó que cuando se hace pasar una corriente eléctrica por un circuito formado por dos metales distintos soldados entre sí, en las uniones se produce una **diferencia de temperaturas** que da lugar a que **en una de las uniones se absorba calor del entorno** (en la que disminuye la temperatura) y **en otra se expulse calor al entorno** (en la que aumenta la temperatura).

De la aplicación de la Ecuación del Balance de Energía en sistemas que no intercambian masa resulta que el **calor que cede la unión caliente** será la **suma de la energía eléctrica aportada al conjunto** (o termoelemento) y **el calor que éste absorbe por su unión fría**.



Figura 7.
Jean Charles Athanase Peltier.

Los **termoelementos** configurados de esta manera constituyen una **máquina frigorífica** que, como tal, podrá ser empleada como **sistema de refrigeración** (para obtener frío) o como **bomba de calor** (para obtener calor).

EL EFECTO THOMSON.

En 1.851 el físico y matemático británico **William Thomson** (Lord Kelvin) experimentó que cualquier material conductor eléctrico (excepto el Plomo) absorbe o libera calor cuando por él se hace circular una corriente eléctrica.

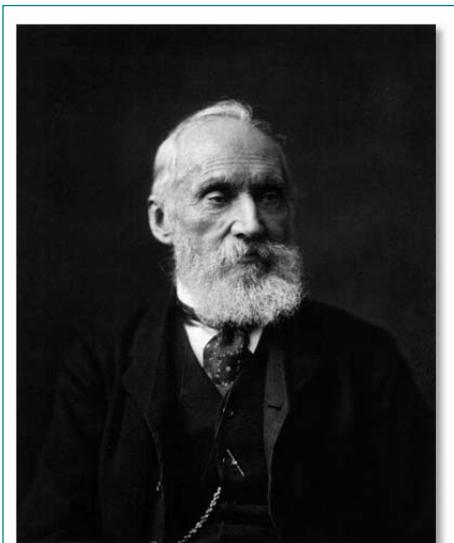


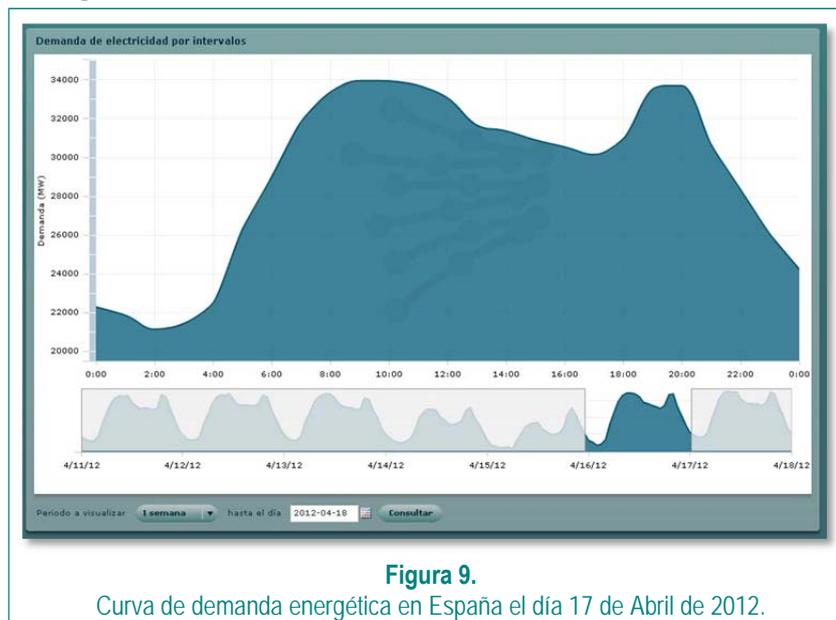
Figura 8.
William Thomson (Lord Kelvin).

La aportación de Thomson sobre las de Peltier y Seebeck se encuentra en la observación de **ambos fenómenos en sólo un conductor eléctrico**, sin ser necesario recurrir a una unión soldada entre conductores de distintas naturalezas. Thomson aportó, además, un **modelo matemático** común a los dos efectos que es el que se emplea actualmente en la Bibliografía para explicar sus fundamentos. La evolución del conocimiento ha dado explicaciones a nivel más profundo a través de los conceptos posteriores definidos en la Termodinámica Estadística y la Mecánica Cuántica.

1.1.3 Vehículos Eléctricos.

El coche eléctrico está a punto de irrumpir con fuerza en el mundo de la Automoción. Muchas cosas van a tener que cambiar, pero para que pueda introducirse en el mercado de una forma realmente competitiva con los vehículos térmicos actuales, estos cambios habrán de ser progresivos. Quedan muchas cuestiones de índole energética por resolver.

Existen, en la actualidad, varias **posibilidades** en lo que a **tecnología eléctrica de propulsión** se refiere. La que ya está **implantada**, aunque no muy extendida, es la que corresponde al **vehículo híbrido**. La tecnología incipiente que de forma inminente va a irrumpir en el panorama de la propulsión eléctrica en automoción es la del vehículo eléctrico puro, cuyo motor será alimentado por **baterías eléctricas**. En el horizonte se sigue encontrando el vehículo eléctrico alimentado por **pila de combustible a Hidrógeno**.



En cuanto a la propulsión por motor eléctrico alimentado por **baterías** existen algunas **cuestiones que solventar** y sobre las que la Administración está dando algunos pasos. La carga de las baterías es, aún, lenta. Se piensa en una carga de unas **8 h para una autonomía de unos 100 km**, existiendo la posibilidad de **cargas rápidas** a costa de un **acortamiento de vida útil** de las baterías. También se piensa en la posibilidad del **intercambio de baterías** en lo que se llamarían “electrolineras”, que se encargarían de tener baterías cargadas y dispuestas para su sustitución en el vehículo cuando las suyas estuvieran descargadas. Tanto la carga rápida como la carga y sustitución en “electrolineras” se piensan como alternativas que aportarían al vehículo eléctrico la disponibilidad que tienen en la actualidad los vehículos a motor térmico convencional e híbridos.

Surge, de esta forma, una primera cuestión que aunque no es objeto de este trabajo, conviene señalar: ¿existe en España **potencia eléctrica instalada suficiente** como para atender de forma generalizada a esta nueva necesidad? La respuesta es que **no en cualquier momento**. La curva de demanda energética no es plana: presenta franjas horarias en las que el consumo se llega a reducir hasta más de la mitad del máximo (Figura 9). Por hacernos una idea, en España el máximo se encuentra en torno a los 35 GW en las llamadas “**horas punta**” y el mínimo en torno a los 20 GW en las llamadas “**horas valle**”. En las horas punta no hay potencia instalada suficiente para atender completamente la demanda esperada por la carga de las baterías de todo el parque previsto de vehículos eléctricos en esta modalidad, pero sí en las horas valle, por lo que, en general, se piensa en la carga de las baterías en dichos periodos.

No obstante, la demanda del vehículo eléctrico en estas horas dejaría excesivamente ajustada la curva a la potencia total instalada, más aún cuando se están desconsiderando, de hecho, los informes técnicos emitidos por el Consejo de Seguridad Nuclear acerca de la vida útil de algunas **Centrales**

Nucleares, iniciándose sus procesos de cierre aun cuando en dichos informes se avale que dichas Centrales están en unas condiciones de operación óptima y segura, pudiendo continuar su actividad. El accidente de la Central de Fukushima, en Japón, está aportando sólidos argumentos a favor del cierre de las Centrales Nucleares.

Aunque se estén dando algunos pasos en el sentido de **potenciar nuevas formas de generación de energía** (energías renovables) y **ahorro energético** como son la sustitución de luminarias por lámparas led (una tecnología por la que hace algunos años nadie hubiera apostado; algo parecido a lo que está ocurriendo ahora mismo con la tecnología de los dispositivos termoelectrónicos) que disminuirían el consumo en horas valle, no parece que, por el momento, estas medidas puedan cubrir el amplísimo hueco que dejará el cierre progresivo de las Centrales Nucleares que en la actualidad aportan, aproximadamente, el 20% del total de la energía consumida en España y el requerido por la carga de las baterías de los vehículos eléctricos. En otro orden de cosas, y para asegurar la carga de las baterías durante horas valle, las empresas eléctricas tendrán que **incentivar el consumo energético en estos periodos**, como se hizo en su día con la tarifa nocturna. Muchas cosas, como digo, van a cambiar. Algunas de ellas para volver a los inicios.

Por otro lado y en lo que al balance energético del vehículo eléctrico se refiere, el estado actual de la tecnología y de los requerimientos del usuario, que exigirá del vehículo eléctrico similares prestaciones a las del vehículo térmico actual, pone las cosas realmente difíciles, suponiendo un gran reto ingenieril que abrirá **nuevos horizontes a la investigación y el desarrollo en el campo de la automoción**.

Si ya la potencia instalada en España está ajustada para responder a la demanda que supone la carga de las baterías en el parque previsto de vehículos eléctricos, resultará imposible atender a la **demanda adicional que supone la energía necesaria para la climatización y calefacción**, a no ser que se encuentren soluciones tecnológicas que reduzcan su magnitud.

El **usuario** actual es absolutamente **inconsciente** del tremendo **despilfarro energético** que supone el desplazamiento en **vehículos propulsados por motores térmicos**. Los rendimientos, aunque son muy variables y dependen en gran medida de las condiciones de operación (impuestas definitivamente por el usuario), se encuentran en torno al 25%, lo que quiere decir que de cada 100 unidades de energía aportadas como calor en la combustión del combustible, tan sólo 25 se emplean realmente en propulsión. Del 75% restante una parte se emplea en la calefacción o refrigeración del habitáculo y el resto de la energía se pierde en los gases de escape, en el sistema de refrigeración y en el sistema de lubricación del motor.

Pues bien: la llegada del motor eléctrico supone una **revolución cuantitativa** en este balance energético. De entrada, los rendimientos de los motores eléctricos se encuentran ya en torno al 95%, lo que da lugar a que las pérdidas energéticas se reduzcan, aproximadamente, a un 5%, situándolo en una posición de clarísima ventaja con respecto al motor térmico si no se considera, eso sí, el rendimiento del pozo a la rueda (considerado éste, los números ofrecen resultados menos espectaculares si la energía proviene, en definitiva, de Centrales Térmicas). Sin embargo, este **ajuste energético** en lo que a **propulsión** se refiere trae, como consecuencia, una muy **notable disminución en la energía disponible para la calefacción y refrigeración del habitáculo**, lo que indudablemente forma parte de la Seguridad Activa de sus ocupantes y supone un nuevo reto para el que habrá que desarrollar algunas tecnologías que hasta el momento no han sido prácticamente utilizadas con este propósito, precisándose de su optimización en un futuro no muy lejano para adecuarlas a la resolución de este nuevo problema.

En este trabajo se realizará un **balance energético** previo con el fin de calcular, aproximadamente, los **aportes energéticos** que en la actualidad se dan en los **sistemas de calefacción y refrigeración** de los habitáculos de los automóviles (lo que se entiende como necesidades futuras) para, a continuación, exponer las **posibilidades tecnológicas** que aun siendo conocidas, pueden **desarrollarse y optimizarse** para su futura **aplicación en automoción**.

1.2 *Objetivos.*

En la actualidad los sistemas de calefacción y refrigeración empleados en los automóviles aportan un adecuado margen de **confort** aceptado prácticamente por la totalidad de los usuarios, dada su versatilidad. El confort en el habitáculo forma parte, como se ha dicho anteriormente, de la Seguridad Activa de sus ocupantes, ya que es un hecho que la conducción en condiciones no confortables aumenta las posibilidades de sufrir un accidente.

En cualquier vehículo que quiera **competir** con los **vehículos actuales** habrá de **mantenerse esta comodidad**. Pues bien: en la realización de cualquier proyecto de calefacción y refrigeración en el que se pretenda sustituir un procedimiento por otro existen varias formas de llegar a las cantidades energéticas intercambiadas. La más directa respondería al planteamiento de cálculo a partir de las **condiciones actuales**, entendidas éstas como las **condiciones de confort**. De esta forma, se puede llegar a calcular la **energía** que es necesario **aportar al habitáculo** con los procedimientos empleados hoy en día por prácticamente todos los vehículos. Otro camino, mucho más tortuoso y que llevará prácticamente al mismo resultado, consistiría en hacer un balance energético partiendo de cero, estimando todos los posibles intercambios energéticos del habitáculo por conducción, convección y radiación en unas condiciones determinadas de operación.

En este trabajo se empleará el **primer procedimiento** por su sencillez, no pretendiéndose llegar a números exactos (que variarían en función de parámetros que van desde la forma, color y dimensiones del vehículo, hasta los materiales que se han empleado en su fabricación, las condiciones en su entorno, su velocidad, etc.) y, a partir de ahí, buscar **alternativas tanto para su mejor aprovechamiento como para su sustitución**.

En principio, el cálculo de las **necesidades energéticas del habitáculo** se hace a partir del sistema de frío por compresión que incorporan prácticamente todos los vehículos que disponen de sistema de aire acondicionado. A partir de ahí se valoran (siempre aproximadamente) las **necesidades de frío y calor** y se proponen soluciones a adoptar en el vehículo eléctrico.

Para la obtención de **calor**, se describen **soluciones** a partir de:

- Intercambiador que refrigera al motor eléctrico.
- Resistencia eléctrica.
- Bomba de calor por compresión.
- Bomba de calor por absorción (no es objeto de este trabajo).
- Efecto Peltier/Seebeck.

Por su parte, para la obtención de **frío** se describen **soluciones** a partir de:

- Sistema de frío por compresión.
- Sistema de frío por absorción (no es objeto de este trabajo).
- Efecto Peltier/Seebeck.

Pueden existir otras posibilidades tanto de calefacción como de frío, pero recurrirían a la utilización de combustibles, que es justamente lo que se trata de evitar.

1.3 *Planteamiento del trabajo.*

El estudio se dirige especialmente al vehículo eléctrico por los siguientes **motivos**:

1. El **rendimiento del sistema de propulsión** del vehículo eléctrico (del orden del 95 %) es muchísimo mejor que el del vehículo térmico (del orden del 25 %) lo que, a pesar de suponer una ventaja clara para el vehículo eléctrico, plantea un reto en el diseño de los sistemas

auxiliares, ya que es evidente que en el vehículo eléctrico dispondrán de una **cantidad de energía notablemente inferior** que la dispuesta en el vehículo térmico, por lo que su gestión deberá ser mucho más eficiente.

2. Los **sistemas de generación de energía eléctrica** (encargados de la carga de las baterías de los vehículos eléctricos cuando éstos lo sean a batería) no pasan por su mejor momento. Una de las fuentes más importantes en el **panorama energético** mundial, la energía nuclear, ha quedado en una situación muy delicada tras el accidente nuclear en Fukushima I y sus graves consecuencias. La energía hidráulica a partir de grandes presas se encuentra también en un momento controvertido debido a la frecuencia, cada vez mayor, de los episodios de sequía, así como la térmica a partir de combustibles fósiles por la producción de CO₂ que les es inherente. Las energías alternativas aparecen en el panorama energético y aunque la eólica comienza a despuntar su aportación es aún pequeña. Nuevamente se hace necesario incidir, por tanto, en la gestión eficiente de la energía eléctrica generada.

He de hacer notar que, en general, cuando, se habla de **climatización**, el término ya incluye a la **calefacción**, abarcando, además, el control tanto de la **limpieza** del aire como de su **humedad relativa**, aspectos ambos que inciden en el confort humano. El **control de la limpieza** del aire, así como de su renovación en el habitáculo corresponde al **filtro del aire entrante** en él y al **habitáculo**, propiamente dicho, como **compartimiento no estanco**, respectivamente.

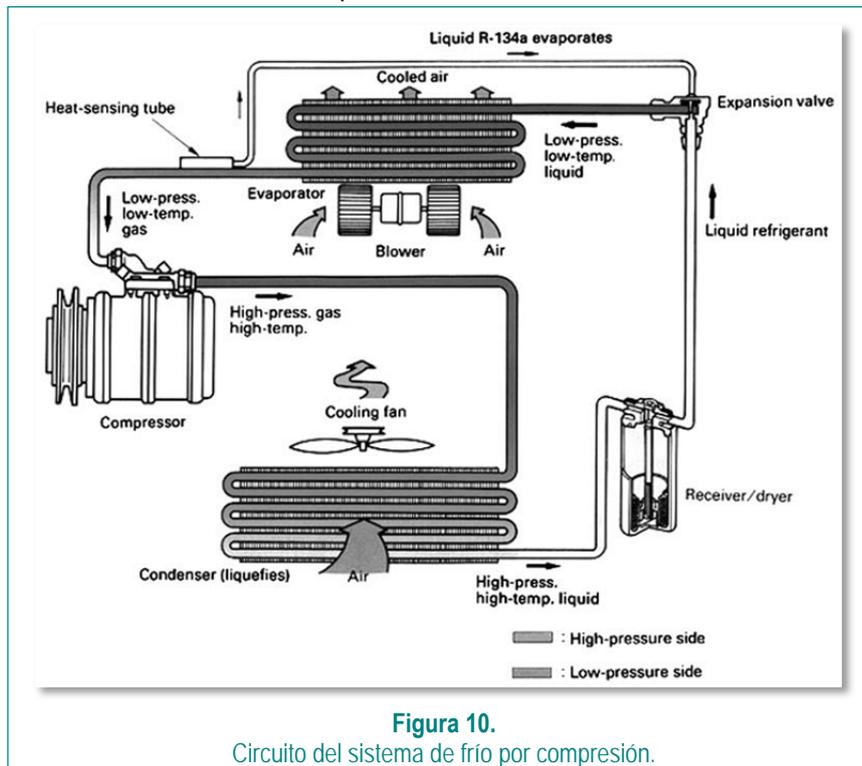
Por su parte, el **control de la humedad** actualmente sólo se hace cuando ésta toma valores altos en el sentido de **deshumidificar**, cobrando este parámetro un especial interés en los sistemas termoeléctricos por cuanto cualquier disminución de la temperatura del sistema por debajo de la temperatura de rocío podría dar lugar a cortocircuitos.

En este trabajo **no se aborda el control** de estos parámetros en el sistema si no, tal y como se ha indicado, su balance energético, y se distinguirá el término de **climatización** del de calefacción cuando se haga referencia a frío o a calor, respectivamente.

2 SITUACIÓN Y ESTADO ACTUAL DEL ARTE.

2.1 *El ciclo de frío por compresión: situación actual.*

En la actualidad prácticamente la totalidad de los vehículos que incorporan sistemas de acondicionamiento de aire emplean **sistemas de frío por compresión** de vapor similar al que se indica en la Figura 10. Aunque no sea frecuente, en algunos de ellos se emplea el ciclo de frío por compresión tanto para la obtención de frío como de calor, cambiando el sentido de circulación del fluido operante mediante una válvula inversora y haciendo que el sistema opere como bomba de calor. Este sistema no es en la actualidad estrictamente necesario, dado que al ser muy bajo el rendimiento del motor térmico hay energía disponible sobrante en forma de calor que se puede utilizar en la calefacción, lo que puede evitar los costes por un lado de la instalación de una válvula inversora y, por otro, del funcionamiento constante del compresor del sistema de frío.



Siendo el sistema más empleado, cabe esperar que si se **sustituye** por cualquier otro, el nuevo responda a las **mismas necesidades** y en las **mismas condiciones** que se dan en éste. En este apartado se pretende hacer un cálculo aproximado de las cantidades energéticas que se satisfacen con el sistema de frío por compresión para investigar posteriormente la posibilidad de su sustitución por algún otro.

En un sistema de frío por compresión hay básicamente cuatro volúmenes de control (evaporador, compresor, condensador y válvula de estrangulamiento) que intercambian masa y en los que se realizan los siguientes procesos termodinámicos:

1 → 2: **Compresión adiabática.**

El proceso de compresión se suele realizar en **compresores pistón cilindro**. Esto es importante porque siendo así la diferencia de presiones entre la salida y la entrada del compresor se mantendrá constante, pudiendo **variar el flujo másico** en función de la **velocidad de giro del cigüeñal** del compresor. La variación en el flujo másico decidirá en las magnitudes de los calores transferidos en los intercambiadores.

La potencia consumida por el compresor será

$$\dot{W}_c = \dot{m}_R \frac{(h_1 - h_{2s})}{\eta_c}$$

donde se ha considerado dicha potencia en función del flujo másico de refrigerante, la entalpía del estado de entrada, h_1 , la entalpía del estado teórico de salida (isentrópico), h_{2s} , y el rendimiento isentrópico del compresor, η_c . En estos cálculos también se debe considerar el rendimiento mecánico del compresor. Se obvia éste último atribuyendo un valor bajo al rendimiento isentrópico de modo que pueda incluirse en él el valor del rendimiento mecánico.

2 → 3: Condensación.

Cuando el flujo abandona el compresor entra en un intercambiador de calor, donde salvo pérdidas de carga (que suelen ser pequeñas) evolucionará **condensándose a presión constante**. La fase de entrada es vapor sobrecalentado, por lo que el proceso de cesión de calor en el intercambiador de calor comenzará con el enfriamiento del flujo (disminuirá su temperatura), hasta el inicio de la condensación. Cuando se inicia la condensación, al mantenerse la presión constante en el intercambiador también se mantendrá constante la temperatura (los cambios de fase a presión constante lo son, también, a temperatura constante).

En algunos condensadores el flujo sale como líquido saturado. En otros, el flujo se subenfía ligeramente. Teniendo en cuenta el Segundo Principio de la Termodinámica (el calor se transfiere espontáneamente desde los sistemas más calientes a los más fríos), la **temperatura mínima en el condensador** debe estar **por encima de la temperatura máxima del entorno** en el que éste funcione. Habitualmente una diferencia de unos 15 °C permite establecer las consideraciones iniciales de Proyecto. Así, si el condensador tiene que intercambiar calor en un entorno a 40 °C, la temperatura mínima del flujo de refrigerante que pasa por él tendrá que estar en torno a los 55 °C. Esta condición determina, en función del refrigerante utilizado, la presión en el condensador.

El calor intercambiado en el condensador viene dado por

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_R (h_3 - h_2)$$

donde se ha considerado dicho calor (por unidad de tiempo) en función del flujo másico de refrigerante y de las entalpías de salida y entrada en el condensador, h_3 y h_2 , respectivamente.

3 → 4: Estrangulamiento.

Al abandonar el condensador, el flujo debe enviarse al evaporador, a una presión inferior. Si se enviara directamente, con un simple tubo, la presión en el condensador disminuiría hasta la presión del evaporador (o ambas cambiarían, una disminuyendo y otra aumentando, hasta encontrarse).

Es necesario, pues, disponer de un elemento que **mantenga la presión en el condensador**. El elemento más barato y sin mantenimiento que se emplea habitualmente en los sistemas de frío por compresión es una válvula o estrangulamiento.

En este tipo de dispositivos se realizan procesos adiabáticos altamente irreversibles en los que la **entalpía se mantiene aproximadamente constante**.

No hay intercambios de calor ni trabajo en la válvula de estrangulamiento, por lo que en ella sólo se puede escribir

$$h_3 = h_4$$

donde h_3 y h_4 son las entalpías de entrada y salida del flujo en la válvula, respectivamente.

4 → 1: Evaporación.

Cuando el flujo sale de la válvula de estrangulamiento entra en el evaporador, que es otro intercambiador de calor en el que, como en el condensador, salvo pérdidas de carga (que suelen ser también pequeñas), el flujo **se evapora a presión constante**.

En la salida de la válvula de estrangulamiento el vapor suele encontrarse en forma bifásica (vapor húmedo), lo que asegura que su temperatura es la que corresponde a la de saturación a la presión de salida de la válvula. Esta presión es la que se mantiene constante en el evaporador. El flujo sale del evaporador en forma de vapor saturado o, en ocasiones, ligeramente sobrecalentado para asegurar que en ningún caso entren gotas en el compresor, ya que de ser así éste podría resultar seriamente dañado, comprometiéndose su integridad.

Nuevamente, ateniéndose al Segundo Principio de la Termodinámica (el calor se transfiere desde los sistemas más calientes a los más fríos) habrá de tenerse en cuenta que si en el evaporador el flujo tiene que absorber calor, su **temperatura máxima debe ser inferior a la mínima estimada para el entorno en el que tenga que absorber calor**. Nuevamente también, una diferencia de temperaturas de unos 15 °C es aceptable para iniciar cálculos que permitan aproximarse en orden de magnitud. Así, si se pretende que el evaporador intercambie calor en un entorno a 20 °C bastará con una temperatura de 5 °C en el flujo. Esta temperatura determina, también en función del refrigerante empleado, la presión en el evaporador.

El calor intercambiado en el evaporador viene dado por

$$\dot{Q}_F = \dot{m}_R (h_1 - h_4)$$

donde se ha considerado dicho calor (por unidad de tiempo) en función del flujo másico de refrigerante y de las entalpías de salida y entrada en el evaporador, h_1 y h_4 , respectivamente.

En el sistema de frío pueden existir otros dispositivos pero no interfieren en su comportamiento energético.

2.2 Sistemas termoeléctricos: situación actual.

EL EFECTO JOULE.

Es el más **extendido** de todos por su **simpleza**. Sin embargo, es el más **limitado** en uso. Por un lado, tan sólo permite, como se ha dicho, la transformación de energía eléctrica en trabajo de rozamiento y, posteriormente, en calor. La magnitud del trabajo de rozamiento (W) obtenido de un conductor por el que circula una intensidad de corriente I (A), sometido a una diferencia de potencial eléctrico E (V) y cuya resistencia eléctrica es R (Ω) viene dada por

$$\left. \begin{array}{l} \dot{W} = VI \\ V = IR \end{array} \right\} \Rightarrow \dot{W} = RI^2$$

La Ecuación del Balance de Energía para sistemas cerrados, empleando el convenio ingenieril para el trabajo intercambiado por unidad de tiempo, viene dada por

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$

Como la resistencia eléctrica no intercambia masa es aplicable la ecuación anterior. Si evoluciona en régimen estacionario, resulta

$$\frac{dE}{dt} = 0 \Rightarrow \dot{Q} = \dot{W}$$

Por tanto, el calor desprendido por unidad de tiempo por la resistencia eléctrica debido al efecto Joule, cuando ésta evoluciona en régimen estacionario, resulta ser

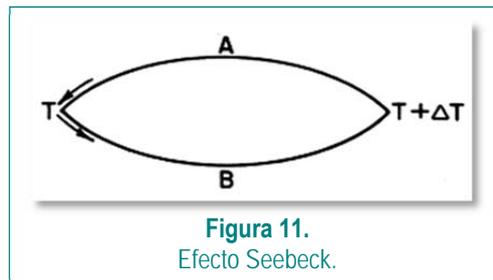
$$\dot{Q} = RI^2$$

El efecto Joule supone la destrucción absoluta de la utilidad de la energía eléctrica (prácticamente toda la energía eléctrica es exergía). Es, de todas las opciones que se presentan en este trabajo, la **peor** para obtener calor en lo que a rendimiento exergético se refiere. Además, **no es útil para obtener frío**. La limitación que sostiene esta afirmación la impone el Segundo Principio de la Termodinámica, que afirma que los sucesos espontáneos ocurren en sólo un sentido.

En este caso, es la aparición del trabajo de rozamiento la que limita el sentido de los intercambios energéticos. El conductor **se calienta y aumenta su temperatura**. El calor, según el Enunciado de Clausius del Segundo Principio de la Termodinámica, **sólo se transfiere espontáneamente de los cuerpos calientes a los fríos, no al revés**.

EL EFECTO SEEBECK.

Como se ha dicho, Thomas Seebeck encontró que por un circuito eléctrico formado por dos conductores de naturaleza distinta colocados en serie y cuyas **uniones soldadas** se ubicaban en **recintos a diferentes temperaturas** circulaba una corriente eléctrica que era capaz de desviar la aguja de una brújula por efecto del campo magnético que generaba.



De la misma forma, **si se abre el circuito** en el que se encuentran los dos conductores con sus respectivas uniones soldadas ubicadas en dos recintos a temperaturas distintas, entre sus extremos se aprecia una **diferencia de potencial eléctrico** cuya **magnitud** depende tanto de los **metales** empleados como conductores, como de la **diferencia de temperaturas** entre los recintos en los que se encuentran las uniones soldadas.

La relación entre la Fuerza Electromotriz (a la que a menudo se refiere la Bibliografía como Fuerza Termo Electromotriz, f.t.e.m.) entre los extremos del circuito eléctrico abierto, E_{AB} , y la diferencia de temperatura entre los recintos en los que se ubican las uniones soldadas, ΔT , viene dada por

$$\alpha_{AB} = \frac{dE_{AB}}{dT} = \alpha_A(T) - \alpha_B(T)$$

donde $\alpha_A(T)$ y $\alpha_B(T)$ son las llamadas **potencias termoeléctricas absolutas** de los conductores que componen el circuito, A y B, que son características de cada metal y, además, dependen de la temperatura, y α_{AB} es el llamado **coeficiente de Seebeck**, que mide justamente la **dependencia entre la Fuerza Electromotriz generada y la temperatura**. La ecuación anterior evidencia que el coeficiente α_{AB} también dependerá de la temperatura. En la práctica se puede comprobar que α_{AB} aumenta con la temperatura.

Por su parte, mientras la intensidad de la corriente generada en el circuito cerrado depende de la resistencia de los conductores, la Fuerza Electromotriz no depende de sus respectivas resistividades ni tampoco de la distribución de temperaturas en ellos.

El Efecto Seebeck fue también observado en 1.855 por el físico inglés **John Strutt** (Lord Rayleigh) quien planteó la posibilidad de la **utilización de los dispositivos termoeléctricos en la generación de energía eléctrica**. Sin embargo, los **bajísimos rendimientos** obtenidos han ido **retrasando** el desarrollo de esta tecnología en su uso industrial y doméstico. No ha sucedido así en el campo militar y espacial, donde los costes no han sido (hasta ahora) tan limitantes.

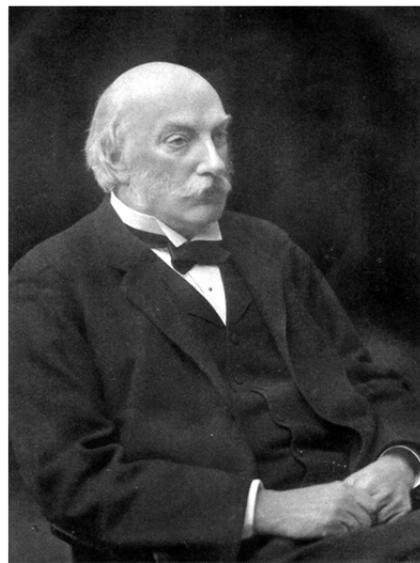


Figura 12.
John Strutt (Lord Rayleigh).

Así, en la actualidad y dado el desarrollo y el camino hacia el que se está orientando el campo de la Automoción no es descartable un nuevo y gran impulso de esta tecnología en la producción de energía eléctrica auxiliar en el automóvil.

EL EFECTO PELTIER.

Como ya se ha indicado, el Efecto Peltier consiste en el **calentamiento o enfriamiento de la unión soldada** de **dos conductores** eléctricos de **distinta naturaleza** cuando se conectan en **serie** y se hace pasar por ellos una corriente eléctrica.

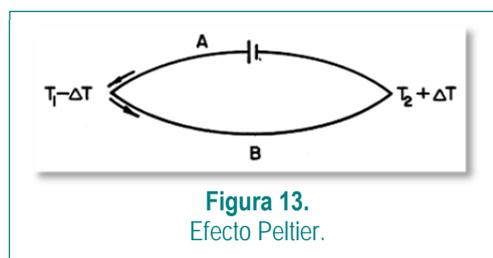


Figura 13.
Efecto Peltier.

En un circuito Peltier se observa que al **invertir** el sentido de la corriente eléctrica también se **invierte el sentido del flujo de calor**, de modo que la unión soldada que antes se enfriaba ahora se calienta y la que antes se calentaba, ahora se enfría. Todo ello **sin partes móviles** y sin la necesidad de **ningún fluido** que tenga que cambiar de fase, comprimirse, evaporarse...

El Efecto Peltier aporta a la idea inicial de la climatización en el Automóvil una **versatilidad necesaria en el vehículo eléctrico**, ya que el mismo fenómeno puede dar lugar tanto a calefacción (si se emplea como bomba de calor) como a refrigeración (si se emplea como sistema de frío o refrigerador).

Los **materiales** empleados en la industria termoeléctrica han sido básicamente los semiconductores como el Bismuto (Bi_2), Telurio (Te_3), Antimonio (Sb_2) y Selenio (Se_3) que, combinados, dan lugar a compuestos como Bi_2Te_2 , Bi_2Se_3 ó Sb_2Te_3 .

Esto se debe al tipo de portador de la carga en el conductor. En su forma más simple un dispositivo Peltier consiste en **“pastillas”** de un semiconductor soldados a materiales conductores (generalmente de cobre y plata) en cada extremo.

En esta configuración mínima el segundo material distinto necesario para el efecto Peltier es la **conexión de cobre** que también actúa como conductor para la fuente de alimentación.

MATERIALES TIPO N.

Cuando se añaden **impurezas** a un material base se pueden afectar radicalmente sus **propiedades conductivas**. Por ejemplo, si tenemos un cristal formado inicialmente por Silicio (que tiene cuatro electrones de valencia) pero con impurezas de Arsénico (que tiene cinco electrones de valencia), en el material hay **electrones libres que no se encuentran en la estructura cristalina**.

Estos electrones se encuentran muy **débilmente ligados**, de modo que cuando se aplica una **diferencia de potencial** eléctrico pueden fácilmente **ponerse en movimiento** dando lugar a una corriente eléctrica. Los electrones débilmente ligados son considerados como **portadores de carga** en este material **“dopado negativamente”**, al que se llama **material tipo “N”**.

El **flujo de electrones** en un material tipo N se realiza **desde el polo negativo hacia el positivo**. Esto es debido a que los electrones son **repelidos** por el polo negativo y atraídos por el positivo de la fuente de energía eléctrica.

MATERIALES TIPO P.

También es posible configurar un cristal conductor añadiendo **impurezas** que tengan **un electrón de valencia menos**. Por ejemplo, si se utilizan impurezas de Indio (que tiene tres electrones de valencia) a un cristal de Silicio se crea una estructura cristalina que tiene **“huecos”** en su interior, es decir, lugares en el cristal donde debería encontrarse, en condiciones normales, un electrón para que el material fuese neutro.

Estos llamados “huecos” **facilitan a los electrones su flujo** a través del material cuando se aplica una **diferencia de potencial** eléctrico. En este caso, los huecos son considerados **portadores de carga** en este material “dopado positivamente” al que se llama **material tipo “P”**.

Los portadores de carga positiva son **repelidos** por el polo positivo de una fuente de energía eléctrica y atraídos hacia el polo negativo. Por tanto, el **flujo de la corriente de “huecos”** se realiza en **sentido opuesto al del flujo de electrones**.

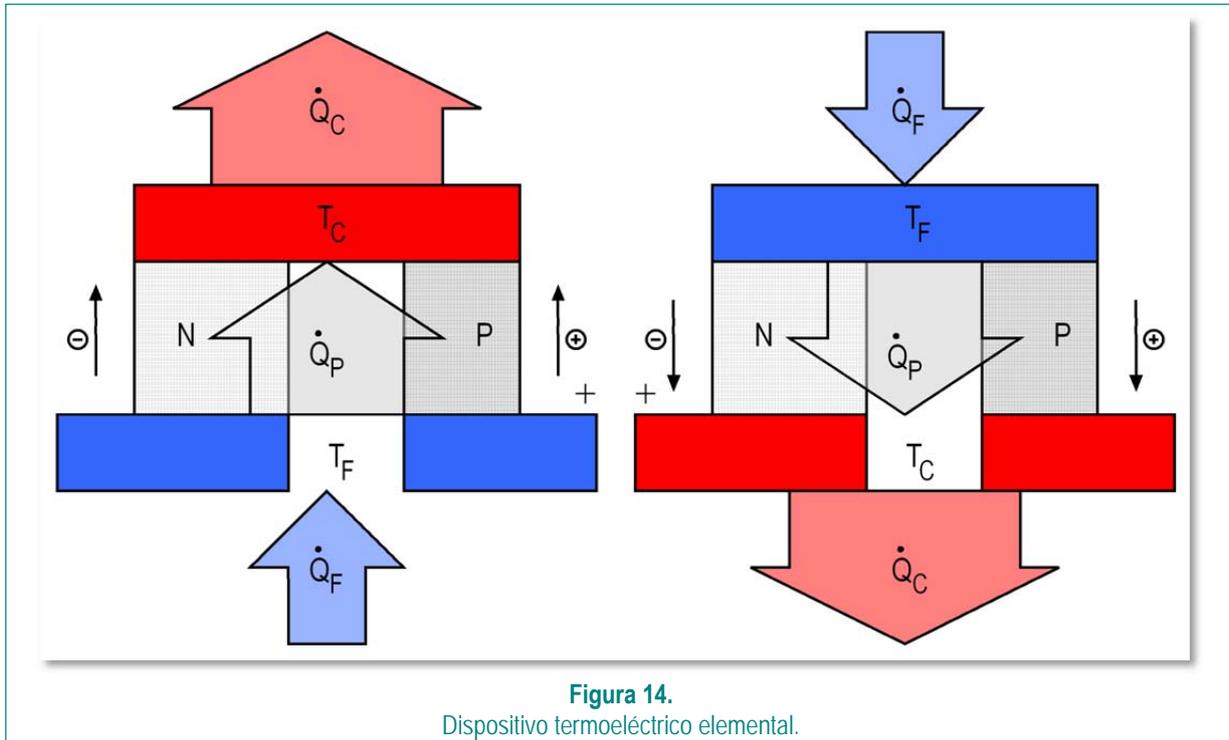
DISPOSITIVO TERMOELÉCTRICO ELEMENTAL.

En la Figura 14 se muestran dos materiales distintos, uno N y otro P, en un dispositivo TE elemental.

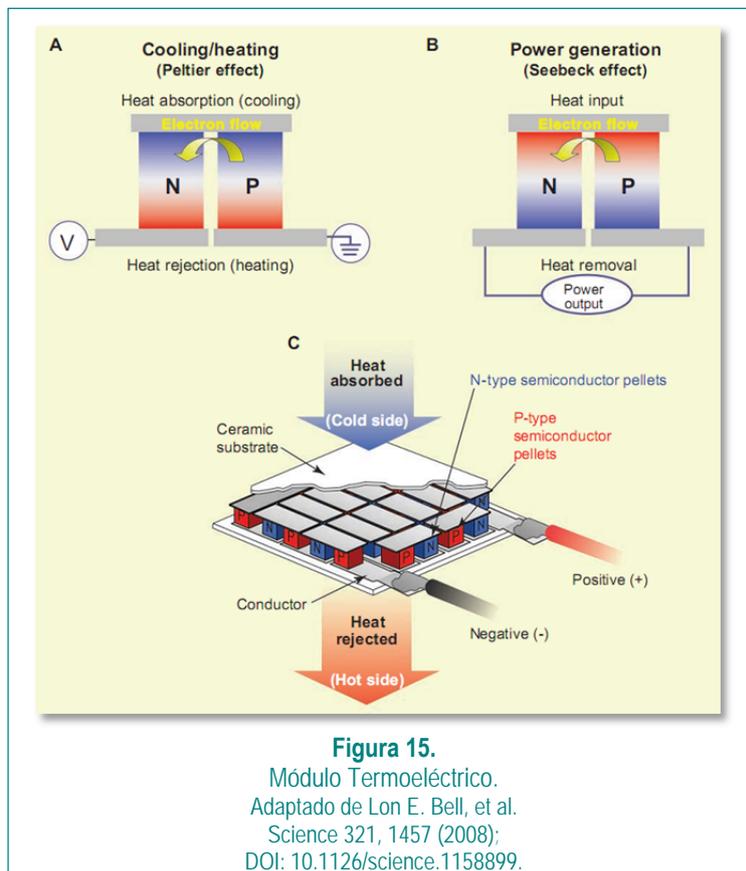
El **calor se transfiere en el mismo sentido de la carga en el circuito** (se puede decir que los portadores de carga son los causantes últimos de la transferencia de calor).

Por tanto, el **flujo de electrones** se desarrolla constantemente **desde el polo negativo** de la fuente de tensión a través de la pastilla N, a través de la unión de cobre, a través de la pastilla P y de nuevo hacia el polo positivo de la fuente de tensión.

Por su parte, los **portadores de carga positiva** (huecos) en el material P son **repelidos por el polo positivo** de la fuente de tensión y **atraídos hacia el polo negativo**, de modo que su flujo se desarrolla desde el polo positivo a través de la pastilla P y el conductor de Cobre hacia el terminal negativo.



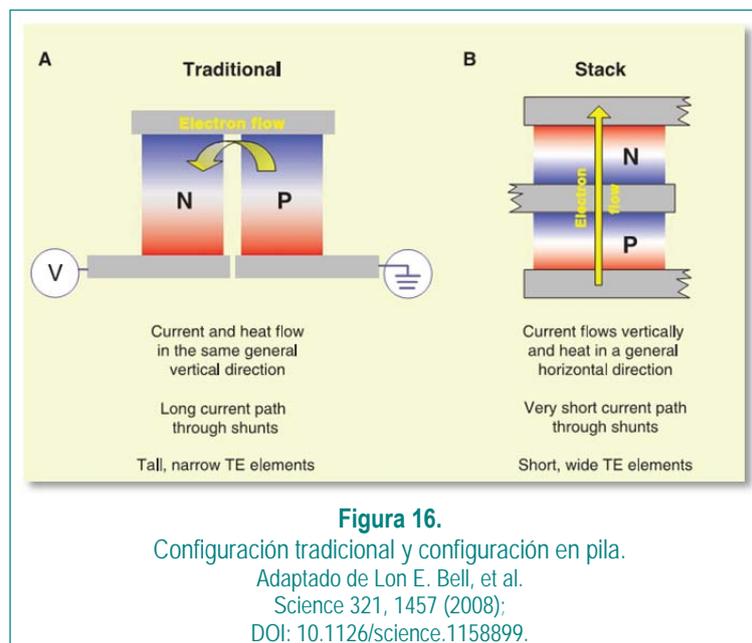
Cuando se aplica una fuente de tensión continua se transfiere calor desde una cara del dispositivo hacia la otra, donde tiene que ser eliminada con un sumidero de calor. Habitualmente, en los módulos termoeléctricos se suelen disponer refrigeradores por **aletas**, para favorecer los procesos de transferencia de calor.



El lado frío se suele emplear para enfriar. **Si se cambia el sentido de la corriente eléctrica el aparato es un excelente calentador, funcionando como bomba de calor.** Ordenando las pastillas N y P en pares y configurando uniones entre ellas con cobre y plata en forma de placas se puede conseguir un **circuito en serie** que puede mantener un **flujo de calor unidireccional**. Empleando este comportamiento especial de los materiales termoeléctricos se pueden **unir muchas pastillas** en ordenaciones rectangulares para crear **módulos termoeléctricos**.

Los módulos termoeléctricos pueden **bombear cantidades apreciables de calor** (existen ya en el mercado módulos de hasta 400 W) y como están conectados en serie su funcionamiento requiere de fuentes de corriente continua. Los módulos más comunes conectan 254 pastillas, alternando tipos P y N y emplean tensiones continuas de alimentación de entre 12 V y 16 V, consumiendo entre 4 y 5 A.

Una **unidad termoeléctrica** típica es aproximadamente un **cuadrado** de unos milímetros o unos centímetros. En la práctica se suelen emplear como **sumideros de calor** (en modo calefacción) o como **disipadores de calor** en otros medios como son aire, agua, etc. El calor debe ser transferido desde el objeto que quiere enfriarse o calentarse hacia el módulo Peltier, y el calor debe ser transferido desde el módulo Peltier hasta el sumidero de calor.



Los sistemas termoeléctricos son a menudo diseñados para **transferir calor** hacia tanto **líquidos** como **sólidos**. En el caso de los sólidos usualmente se encuentran montados sobre el módulo termoeléctrico. Los **líquidos** suelen hacerse circular a través de un **intercambiador de calor** (habitualmente fabricado en aluminio o cobre), montado sobre la unidad Peltier. Ocasionalmente se pueden también emplear líquidos circulando en la cara caliente de dispositivos termoeléctricos de enfriamiento para disipar efectivamente todo el calor.

Los dispositivos de Peltier empleados tanto para enfriamiento como para calentamiento pueden **cambiar las temperaturas muy rápidamente**, pero para **evitar daños térmicos** en las dilataciones y/o contracciones, la **velocidad del cambio de temperatura** se suele **controlar** en torno a 1 °C/s. Es teóricamente posible conseguir una diferencia de temperaturas en un módulo Peltier de hasta 75 °C, pero en la práctica no se ha podido hacer, encontrándose dicha diferencia en aproximadamente unos 60 °C.

Otra cuestión a considerar es que si se emplea un módulo termoeléctrico para **enfriar a temperaturas próximas a la de rocío** (o, incluso, a la de congelación), el vapor de agua del aire húmedo puede condensar o solidificar en el módulo, lo que puede causar **corrosión o cortocircuito**. Una solución para esto puede ser hacer operar el módulo en **ambientes muy secos** (en vacío) o en una **atmósfera seca de Nitrógeno**, cuando ello sea posible.

El **control** de los sistemas termoeléctricos se realiza habitualmente **variando la tensión de la alimentación**, aunque también se pueden controlar mediante el empleo de pulsos con modulación, en cuyo caso se recomienda emplear una frecuencia superior a 2 kHz y que la tensión aplicada no exceda de la máxima recomendada, ya que esto provocaría que el módulo trabajase a una temperatura superior.

La Termodinámica demuestra que en la práctica el **efecto** podría ser **prácticamente reversible** (con una **generación de entropía prácticamente nula**) por lo que el **coeficiente de operación** del circuito como sistema de frío sería, entonces, **prácticamente el máximo**. También se demuestra, en la práctica, que el efecto es **independiente de la forma y dimensiones del contacto y de los conductores**, dependiendo únicamente de la **naturaleza** de éstos y de las **temperaturas** a que se sometan sus uniones soldadas.

De la observación de los intercambios energéticos en la unión soldada se tiene que **la relación entre el calor intercambiado por unidad de tiempo debido al efecto Peltier (\dot{Q}_p) y la intensidad de corriente que circula por ella (I) permanece constante**. A esta relación se le llama *coeficiente de Peltier* (π_{AB}) y viene dada por

$$\pi_{AB} = \pm \frac{\dot{Q}_p}{I} \Rightarrow \dot{Q}_p = \pm \pi_{AB} I$$

El signo \pm indica que **el calor puede ser tanto absorbido como cedido**.

Para una unión, a una temperatura T , se demuestra que existe una **relación entre el coeficiente de Peltier y las potencias termoeléctricas absolutas de cada uno de los conductores** según la expresión

$$\pi_{AB} = T [\alpha_B(T) - \alpha_A(T)]$$

por lo que sustituyendo en la ecuación anterior se puede obtener el **calor intercambiado en cada unión soldada por unidad de tiempo en función de las potencias termoeléctricas absolutas de los conductores**, que en la práctica resultan más fáciles de medir que el coeficiente de Peltier, resultando

$$\dot{Q}_p = \pm I T [\alpha_B(T) - \alpha_A(T)]$$

Como se vio anteriormente,

$$\alpha_{AB} = \frac{dE_{AB}}{dT} = \alpha_A(T) - \alpha_B(T)$$

de donde

$$\dot{Q}_p = \pm \alpha_{AB} I T = \pm \frac{dE_{AB}}{dT} I T$$

Esta expresión se emplea a continuación.

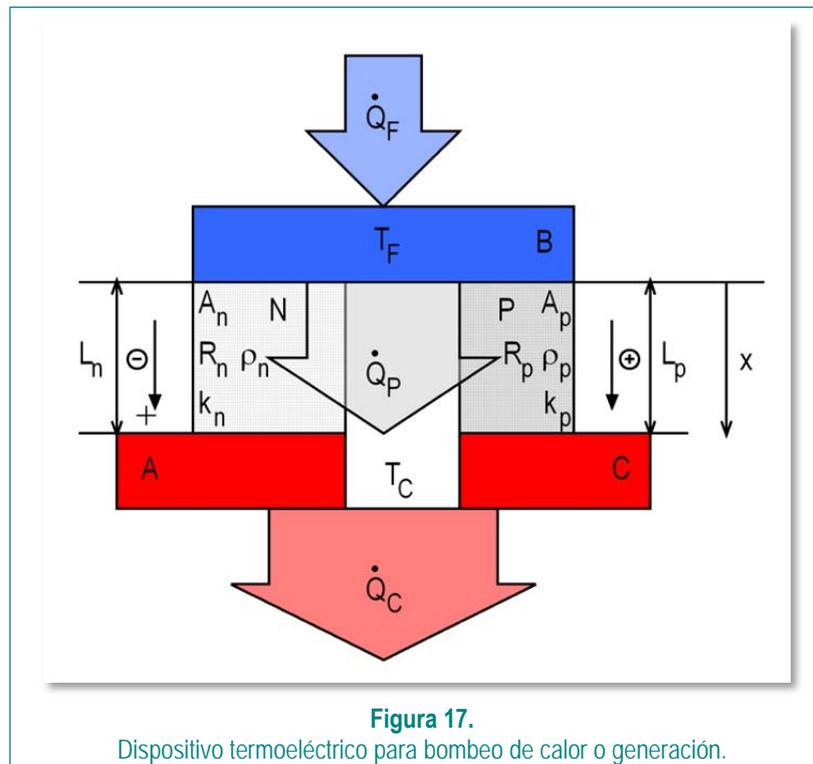
2.3 Refrigeración termoeléctrica.

Con el objeto de obtener una **expresión que permita determinar la eficiencia de la conversión energética en un dispositivo termoeléctrico** consideremos un dispositivo termoeléctrico elemental como el mostrado en la figura 17.

Dicho dispositivo termoeléctrico elemental consiste en **dos ramales**, uno tipo P y otro tipo N **soldados a conductores metálicos**, A, B y C, en los que inicialmente se supone resistencia eléctrica nula, en la forma en que se indica en dicha figura 17.

Los ramales tienen una **longitud** L_p y L_n , y una **sección transversal** A_p y A_n , respectivamente. En general, las relaciones L_p/A_p y L_n/A_n no tienen por qué ser iguales. A pesar de que pudiera parecer al contrario, el funcionamiento en régimen estacionario no se ve afectado por la **forma** de los ramales, pero sí por sus **dimensiones**, como más adelante se verá.

Éstos se muestran en la figura con la misma longitud simplemente por simplicidad.



En lo sucesivo se considera que el calor se transfiere únicamente por **conducción** desde la fuente térmica B hacia el sumidero AC a lo largo de los ramales del termopar. La conexión de cualquier número de pares, **eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo** afectará a la **potencia** del conjunto, pero **no a su eficiencia**.

El dispositivo termoeléctrico **puede ser empleado de dos formas**: si se conecta una fuente de tensión a través de A y C (A positivo y C negativo) y, por tanto, la corriente eléctrica es conducida a través del dispositivo, éste actuará como un **sistema de refrigeración** (como se ve en la figura 17).

Si, por el contrario, la corriente eléctrica se conduce en sentido contrario, es decir, desde C hasta A (C positivo y A negativo) se comportará como una **bomba de calor**, aunque esta concepción es relativa de a qué lado se dispongan los sistemas a calentar o a enfriar, obviamente.

El calor, en general, es **bombeado** desde la fuente fría a la temperatura T_F hasta la fuente caliente, a la temperatura T_C por el efecto Peltier cuando el termopar se somete a tensión eléctrica. De igual forma, si se coloca una **resistencia eléctrica** cerrando el circuito entre A y C, una fuente de calor en B causará una **corriente eléctrica** en el circuito debida al **efecto Seebeck**, es decir, el dispositivo termoeléctrico actuará como un **generador eléctrico**.

Se puede demostrar que **el coeficiente de operación del dispositivo termoeléctrico cuando se emplea como refrigerador y su eficiencia cuando se emplea como generador pueden relacionarse mediante un parámetro, llamado figura de mérito** ("figure of merit" es la expresión literal que se emplea en la Bibliografía), que emplea algunas propiedades de los materiales empleados en cada ramal.

2.4 Potencia de refrigeración termoeléctrica.

Cuando se emplea un circuito Peltier como sistema de **refrigeración o bomba de calor** es interesante conocer por un lado, la **potencia eléctrica necesaria** y, por otro, la **magnitud del calor intercambiado por unidad de tiempo**. La relación entre ambas proporcionará el **coeficiente de operación** del frigorífico de Peltier.

El coeficiente de operación es interesante por cuanto aporta información sobre la **calidad de la conversión energética**. Además, es necesario **calcular las potencias intercambiadas** tanto en forma de calor como en forma de energía eléctrica para evaluar la posibilidad de **sustituir** la tecnología actual (frío por compresión de vapor) por ésta.

Según Rowe, D., en CRC Handbook of Thermoelectrics se considera un sistema Peltier por el que circula una intensidad de corriente eléctrica I , en el que la temperatura de la fuente de calor es T_C y la del sumidero T_F . **El calor neto intercambiado en cada uno de los ramales vendrá dado por la suma del calor intercambiado por el efecto Peltier más el calor intercambiado en la conducción térmica en cada ramal.**

Es conveniente tener en cuenta que **el calor intercambiado por efecto Peltier es opuesto al calor intercambiado por conducción térmica**. Así, si se llama k_p y k_n a las conductividades térmicas y α_p y α_n a las potencias termoeléctricas absolutas de los ramales P y N, respectivamente, resulta

$$\left. \begin{aligned} \dot{Q}_p &= \alpha_p I T - k_p A_p \frac{dT}{dx} \\ \dot{Q}_n &= -\alpha_n I T - k_n A_n \frac{dT}{dx} \end{aligned} \right\}$$

Por otra parte, el calor generado debido al **efecto Joule** vendrá dado en cada ramal, según se ha visto, por

$$\left. \begin{aligned} \dot{Q}_{Jp} &= R_p I^2 \\ \dot{Q}_{Jn} &= R_n I^2 \end{aligned} \right\}$$

Las **resistencias eléctricas** en cada ramal, R_p y R_n , se pueden poner en función de sus correspondientes resistividades como $R_p = \rho_p L_p/A_p$ y $R_n = \rho_n L_n/A_n$, resultando

$$\left. \begin{aligned} \dot{Q}_{Jp} &= I^2 \rho_p \frac{L_p}{A_p} \\ \dot{Q}_{Jn} &= I^2 \rho_n \frac{L_n}{A_n} \end{aligned} \right\}$$

El **calor generado por efecto Joule por unidad de longitud** será

$$\left. \begin{aligned} \frac{\dot{Q}_{Jp}}{L_p} &= I^2 \frac{\rho_p}{A_p} \\ \frac{\dot{Q}_{Jn}}{L_n} &= I^2 \frac{\rho_n}{A_n} \end{aligned} \right\}$$

Y según la **ecuación general de la transferencia de calor por conducción con generación interna de calor**, se podrá escribir

$$\left. \begin{aligned} -k_p A_p \frac{d^2 T}{dx^2} &= l^2 \frac{\rho_p}{A_p} \\ -k_n A_n \frac{d^2 T}{dx^2} &= l^2 \frac{\rho_n}{A_n} \end{aligned} \right\}$$

Estas ecuaciones se pueden **integrar** empleando las **condiciones de contorno** (aunque no se entra en detalles de la resolución de la ecuación diferencial). Así, si $T = T_F$ cuando $x = 0$ y $T = T_C$ cuando $x = L_p$ ó $x = L_n$ ($L_p = L_n$) se tiene

$$\left. \begin{aligned} k_p A_p \frac{dT}{dx} &= l^2 \frac{\rho_p}{A_p} \left(x - \frac{L_p}{2} \right) + \frac{k_p A_p}{L_p} (T_C - T_F) \\ k_n A_n \frac{dT}{dx} &= l^2 \frac{\rho_n}{A_n} \left(x - \frac{L_n}{2} \right) + \frac{k_n A_n}{L_n} (T_C - T_F) \end{aligned} \right\}$$

Sustituyendo en las ecuaciones de \dot{Q}_p y \dot{Q}_n resulta

$$\left. \begin{aligned} \dot{Q}_{p(x=0)} &= \alpha_p l T_F - l^2 \rho_p \frac{L_p}{2A_p} - \frac{k_p A_p}{L_p} (T_C - T_F) \\ \dot{Q}_{n(x=0)} &= -\alpha_n l T_F - l^2 \rho_n \frac{L_n}{2A_n} - \frac{k_n A_n}{L_n} (T_C - T_F) \end{aligned} \right\}$$

donde se ha tenido en cuenta que $T = T_F$ al ser $x = 0$.

Entonces, si tanto \dot{Q}_p y \dot{Q}_n son intercambiados en $x = 0$ la **capacidad de refrigeración** \dot{Q}_F , haciendo un simple balance de energía en $x = 0$, vendrá dada por

$$\dot{Q}_F = \dot{Q}_{p(x=0)} + \dot{Q}_{n(x=0)}$$

Es decir,

$$\dot{Q}_F = (\alpha_p - \alpha_n) l T_F - \frac{l^2}{2} \left[\rho_p \frac{L_p}{A_p} + \rho_n \frac{L_n}{A_n} \right] - \left[\frac{k_p A_p}{L_p} + \frac{k_n A_n}{L_n} \right] (T_C - T_F)$$

La **resistencia total** correspondiente a las dos resistencias en **serie**, R , será la **suma** de ambas, y éstas, en función de las **resistividades** ρ_p y ρ_n , de las **longitudes**, L_p y L_n y de las **superficies**, A_p y A_n , darán lugar a la expresión

$$R = \rho_p \frac{L_p}{A_p} + \rho_n \frac{L_n}{A_n}$$

Por su parte, y de manera similar, la **conductancia térmica**, k , de las dos resistencias térmicas será

$$k = \frac{k_p A_p}{L_p} + \frac{k_n A_n}{L_n}$$

por lo que sustituyendo en la ecuación anterior resulta

$$\dot{Q}_F = (\alpha_p - \alpha_n) l T_F - \frac{1}{2} R l^2 - k (T_C - T_F)$$

Esta ecuación viene aportada habitualmente como una **especificación técnica** del fabricante del módulo termoeléctrico.

La **representación gráfica o curva característica** para cada módulo forma parte de la **información necesaria** para decantarse por la utilización de uno u otro módulo, en función de las **necesidades a satisfacer**, que habitualmente hacen referencia a la **diferencia de temperaturas** buscada y a la **potencia consumida**. Igualmente, los fabricantes suelen aportar las curvas de **consumo eléctrico**.

Estas curvas se construyen para **diferencias de temperaturas concretas** y siempre a partir de una temperatura de fuente caliente, T_C (que en la bibliografía se suele referir como T_h , del inglés "hot", caliente). Se presentan a continuación.

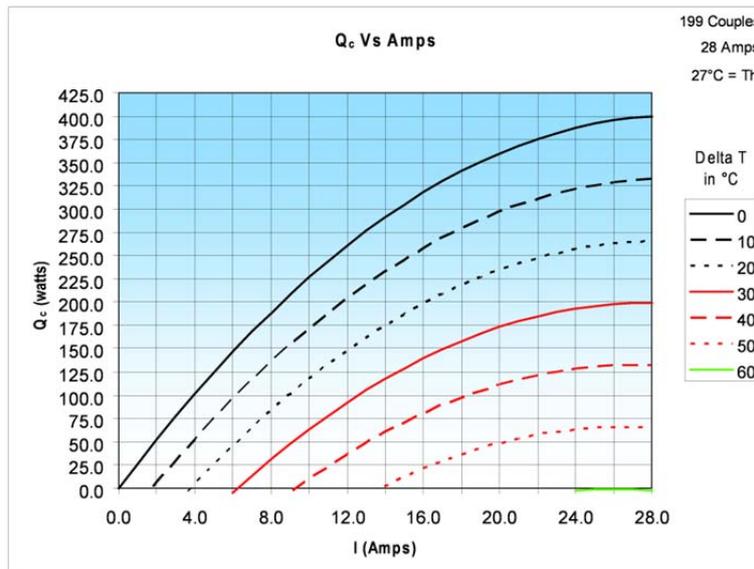


Figura 18.

Curva Q_c -I para un módulo Termoeléctrico.

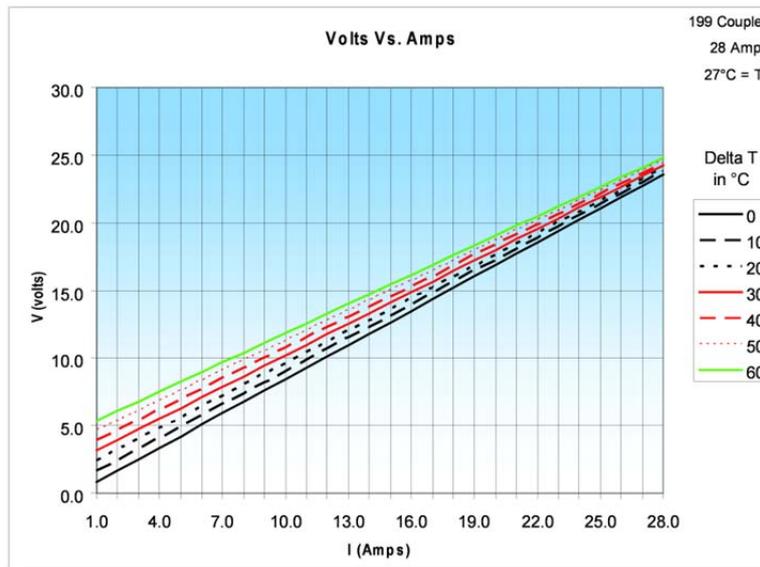


Figura 19.

Curva V-I para un módulo Termoeléctrico.

2.5 Optimización geométrica de la figura de mérito en refrigeración termoeléctrica.

Como se ha visto,

$$\dot{Q}_F = (\alpha_p - \alpha_n) I T_F - \frac{1}{2} R I^2 - k(T_C - T_F)$$

A la vista de esta ecuación se puede apreciar que el término $(\alpha_p - \alpha_n) I T_C$ varía **linealmente** con la **intensidad de la corriente eléctrica, I**, en tanto que el término correspondiente al **calentamiento** por efecto **Joule** lo hace de forma cuadrática ($I^2 R$). Esto significa que existe un **valor para la corriente eléctrica, $I_{Q_{Fmax}}$** , que hace que, según la ecuación, la capacidad de refrigeración alcance un valor **máximo**.

Derivando la expresión de \dot{Q}_F e **igualando a cero** (Rowe, D., CRC Handbook of Thermoelectrics) se obtiene

$$\frac{d\dot{Q}_F}{dI} = 0 \Rightarrow (\alpha_p - \alpha_n) T_F - I_{Q_{Fmax}} R = 0 \Rightarrow I_{Q_{Fmax}} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n) T_F}{R}$$

Entonces la **capacidad de refrigeración** será **máxima**, tomando el valor

$$\dot{Q}_{Fmax} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2 T_F^2}{R} - \frac{1}{2} \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2 T_F^2}{R} - k(T_C - T_F) \Rightarrow \dot{Q}_{Fmax} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2 T_F^2}{2R} - k(T_C - T_F)$$

De esta ecuación se desprende que la capacidad de refrigeración máxima depende, entre otros, de la **diferencia de temperaturas** entre las uniones soldadas, T_C y T_F . De hecho, la **máxima diferencia de temperaturas** que se puede alcanzar entre uniones será aquella que haga que \dot{Q}_F sea nulo, es decir,

$$\dot{Q}_F = 0 \Rightarrow \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2 T_F^2}{2R} = k(T_C - T_F)_{max}$$

de donde

$$(T_C - T_F)_{max} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2 T_F^2}{2Rk}$$

Pues bien: en esta expresión se llama **figura de mérito, Z**, a

$$Z = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{Rk}$$

De esta forma, la ecuación anterior se puede **expresar en función de la figura de mérito** como

$$(T_C - T_F)_{max} = \frac{1}{2} Z T_F^2$$

Se puede aplicar la misma figura de mérito a la generación termoeléctrica.

Según esta última ecuación se puede afirmar que **la refrigeración termoeléctrica no parece práctica a menos que la diferencia máxima de temperatura sea una fracción significativa de la temperatura absoluta, T_C** . Supongamos, por ejemplo, que la temperatura de la fuente es 273 K y la temperatura del sumidero es 303 K. En este caso, $(T_C - T_F) = 30$ K. Sustituyendo valores en la ecuación resulta una figura de mérito de $8.05 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Este era el valor de la figura de mérito en el que se encontraban los sistemas termoeléctricos en los años 50, cuando comenzaba el desarrollo de

los nuevos materiales termoeléctricos basados en semiconductores. Este trabajo condujo a sistemas termoeléctricos con figuras de mérito del orden de $3 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, lo que permite su utilización en diferencias de temperaturas máximas de hasta 80 K, aproximadamente.

Es frecuente hacer referencia a la figura de mérito como ZT en lugar de como Z, tal y como se ha venido empleando hasta ahora. Se pone de manifiesto que **en la búsqueda de nuevos materiales termoeléctricos se ha de tratar de alcanzar valores de ZT en torno a la unidad o mayores.**

Es evidente que la figura de mérito empleada en la ecuación

$$Z = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{Rk}$$

no es una característica de cada uno de los materiales sino más bien de una pareja en particular, ya que incluye términos que implican a las **dimensiones relativas** de los termoelementos. Así, para un determinado par de materiales **el mayor valor de Z se alcanzará cuando el producto Rk sea mínimo.**

Veamos cuándo se alcanza un valor Rk mínimo. Como se ha visto, R y k se han definido como

$$R = \rho_p \frac{L_p}{A_p} + \rho_n \frac{L_n}{A_n}$$

y

$$k = \frac{k_p A_p}{L_p} + \frac{k_n A_n}{L_n}$$

El producto Rk será

$$Rk = \left(\rho_p \frac{L_p}{A_p} + \rho_n \frac{L_n}{A_n} \right) \left(\frac{k_p A_p}{L_p} + \frac{k_n A_n}{L_n} \right)$$

Operando,

$$Rk = \rho_p \frac{L_p}{A_p} \frac{k_p A_p}{L_p} + \rho_p \frac{L_p}{A_p} \frac{k_n A_n}{L_n} + \rho_n \frac{L_n}{A_n} \frac{k_p A_p}{L_p} + \rho_n \frac{L_n}{A_n} \frac{k_n A_n}{L_n}$$

de donde

$$Rk = \rho_p k_p + \rho_n k_n + \rho_p k_n \frac{L_p}{A_p} \frac{A_n}{L_n} + \rho_n k_p \frac{L_n}{A_n} \frac{A_p}{L_p}$$

Haciendo

$$\Omega = \frac{L_p}{A_p} \frac{A_n}{L_n} \Rightarrow \frac{1}{\Omega} = \frac{L_n}{A_n} \frac{A_p}{L_p}$$

Y sustituyendo en la expresión de Rk, resulta

$$Rk = \rho_p k_p + \rho_n k_n + \rho_p k_n \Omega + \rho_n k_p \frac{1}{\Omega}$$

Derivando con respecto a Ω e igualando a cero se obtiene

$$\frac{d(Rk)}{d\Omega} = \rho_p k_n - \rho_n k_p \frac{1}{\Omega^2} = 0 \Rightarrow \Omega = \sqrt{\frac{\rho_n k_p}{\rho_p k_n}}$$

Sustituyendo el valor de Ω ,

$$\frac{L_p}{A_p} \frac{A_n}{L_n} = \sqrt{\frac{\rho_n k_p}{\rho_p k_n}} \Rightarrow \frac{L_p}{A_p} = \frac{L_n}{A_n} \sqrt{\frac{\rho_n k_p}{\rho_p k_n}} \Rightarrow A_n = A_p \frac{L_n}{L_p} \sqrt{\frac{\rho_n k_p}{\rho_p k_n}}$$

Y si $L_p = L_n$, lo que no es infrecuente, por razones constructivas, resulta

$$A_n = A_p \sqrt{\frac{\rho_n k_p}{\rho_p k_n}}$$

Esta relación permite una primera **optimización geométrica** para mejorar la figura de mérito Z.

Este el motivo por el que si los semiconductores P y N han de tener la **misma longitud**, L, por razones constructivas, como se ha dicho, **no tendrán la misma superficie**, y por ello se han venido dibujando siempre con distintos espesores.

Si se sustituye el valor de Ω en la ecuación de Rk resulta

$$Rk = \rho_p k_p + \rho_n k_n + \rho_p k_n \sqrt{\frac{\rho_n k_p}{\rho_p k_n}} + \rho_n k_p \sqrt{\frac{\rho_p k_n}{\rho_n k_p}}$$

Operando,

$$Rk = \rho_p k_p + \rho_n k_n + 2\sqrt{\rho_n k_p \rho_p k_n} = \left[(\rho_p k_p)^{1/2} + (\rho_n k_n)^{1/2} \right]^2$$

Y entonces resulta para la figura de mérito,

$$Z = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{\left[(\rho_p k_p)^{1/2} + (\rho_n k_n)^{1/2} \right]^2}$$

De esta última ecuación se puede deducir que **los coeficientes de Seebeck y Peltier deben ser grandes y de signos opuestos en los dos materiales**. Además, la **conductividad térmica y la resistencia eléctrica deben ser bajas**. En otras palabras: el efecto termoelectrico reversible debe predominar sobre los efectos irreversibles del calor transmitido por conducción y por el calentamiento de Joule.

Actualmente la ecuación obtenida anteriormente es más **compleja** cuando se trata de encontrar un buen material termoelectrico, ya sea de tipo P o N, ya que involucra las propiedades de los termoelementos. Es por esta razón que **se puede encontrar la figura de mérito de un solo material**. Siendo así, se define como

$$Z_{p,n} = \frac{\alpha_{p,n}^2}{\rho_{p,n} k_{p,n}}$$

Sólo en algunos **casos especiales** se puede obtener una **relación entre esta figura de mérito, $Z_{p,n}$, y la figura de mérito Z**. Uno de estos casos se da cuando los materiales tipo P y tipo N son exactamente equivalentes entre sí, aparte del signo del coeficiente de Seebeck. O dicho de otro modo, $\alpha_p = -\alpha_n$ y $k_{pp} = k_{nn}$. Entonces $Z = Z_p = Z_n$. Afortunadamente esta situación se mantiene, al menos aproximadamente, para materiales utilizados en refrigeración termoelectrica a temperaturas ordinarias.

Otro caso de relativa importancia práctica se produce cuando el **producto ρk en una rama es despreciable en comparación con el de la otra rama**. Esto sucede, por ejemplo, si una de las ramas es un **superconductor**. Si un termoelemento tipo n, por ejemplo, se combina con un superconductor para formar un par, el denominador en el lado derecho de la ecuación

$$Z = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{\left[(\rho_p k_p)^{1/2} + (\rho_n k_n)^{1/2} \right]^2}$$

se hace igual a $\rho_n k_n$. Además, el coeficiente absoluto de Seebeck para cualquier superconductor es cero, por lo que en el numerador se obtendría α_n^2 y entonces sería $Z = z_n$.

La práctica común de **equiparar** la figura de mérito de una pareja con la media de los valores de z para las dos ramas **puede conducir a errores importantes**; pero la figura de mérito de un solo material se utiliza ampliamente en la literatura y no hay duda de que es de un gran valor conceptual.

No parece haber ninguna propiedad mejor cuando se trata de un solo material.

2.6 Coeficiente de Operación en refrigeración termoeléctrica.

Cuando la diferencia de temperaturas $T_C - T_F$ es menor que el máximo, se puede construir, pues, un sistema de refrigeración Peltier. Es habitual evaluar la calidad de cualquier sistema de refrigeración en términos de su **coeficiente de operación**, COP (o coefficient of performance). El COP mide la relación entre “**lo obtenido**” y “**lo dado**”; es decir, es una forma de hablar de rendimiento pero adecuada a los sistemas de frío.

La definición de COP **no es distinta** en sistemas de refrigeración termoeléctrica que en sistemas de frío por compresión, ya que en aquéllos también se realiza un ciclo termodinámico (es, literalmente, un ciclo, desde la puesta en marcha hasta el apagado del sistema, ya que se recupera el estado inicial).

Así,

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_F}{\dot{W}}$$

En el caso de un refrigerador termoeléctrico lo **obtenido** es \dot{Q}_F mientras que lo **dado** es la potencia eléctrica aportada. Ésta resultará ser la **suma de la potencia necesaria para contrarrestar los efectos Seebeck y Joule**. Evaluando ésta por separado en cada ramal, resulta

$$\left. \begin{aligned} \dot{W}_p &= \alpha_p I (T_C - T_F) + I^2 \rho_p \frac{L_p}{A_p} \\ \dot{W}_n &= -\alpha_n I (T_C - T_F) + I^2 \rho_n \frac{L_n}{A_n} \end{aligned} \right\}$$

La potencia eléctrica total será, pues,

$$\dot{W} = \dot{W}_p + \dot{W}_n \Rightarrow \dot{W} = \alpha_p I (T_C - T_F) + I^2 \rho_p \frac{L_p}{A_p} - \alpha_n I (T_C - T_F) + I^2 \rho_n \frac{L_n}{A_n}$$

es decir,

$$\dot{W} = (\alpha_p - \alpha_n) I (T_C - T_F) + I^2 \left(\rho_p \frac{L_p}{A_p} + \rho_n \frac{L_n}{A_n} \right)$$

Y como

$$R = \rho_p \frac{L_p}{A_p} + \rho_n \frac{L_n}{A_n}$$

resultará

$$\dot{W} = (\alpha_p - \alpha_n)I(T_C - T_F) + I^2R$$

Y, recordando,

$$\dot{Q}_F = (\alpha_p - \alpha_n)IT_F - \frac{1}{2}RI^2 - k(T_C - T_F)$$

Sustituyendo en la expresión del coeficiente de operación, queda

$$\text{COP} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)IT_F - \frac{1}{2}RI^2 - k(T_C - T_F)}{(\alpha_p - \alpha_n)I(T_C - T_F) + I^2R}$$

Esta ecuación **evidencia la dependencia del COP con la intensidad de la corriente eléctrica que recorre el sistema termoeléctrico**. Derivando la ecuación del COP con respecto a I se puede obtener la intensidad de corriente que le hace máximo. Haciendo las operaciones oportunas dicha intensidad resulta ser

$$I_{\text{COPmax}} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)(T_C - T_F)}{R[\sqrt{1 + ZT_M} - 1]}$$

donde

$$T_M = \frac{T_C + T_F}{2}$$

El coeficiente de operación para esta intensidad resulta ser

$$\text{COP}_{\text{max}} = \frac{T_F \left[\sqrt{1 + ZT_M} - \frac{T_C}{T_F} \right]}{(T_C - T_F) [\sqrt{1 + ZT_M} + 1]}$$

2.7 Coeficiente de Operación en refrigeración en cascada.

Como se ha visto, existe un **límite** en la **disminución de temperatura** que puede lograrse con un **refrigerador Peltier de una sola etapa**. Esto tampoco supone un problema, a priori, cuando se pretenden alcanzar temperaturas por debajo de la que se podría alcanzar con un solo refrigerador. La solución se encuentra en la refrigeración llamada “**en cascada**”, aún a costa de **dispararse en magnitud la potencia necesaria**, como se ve a continuación.

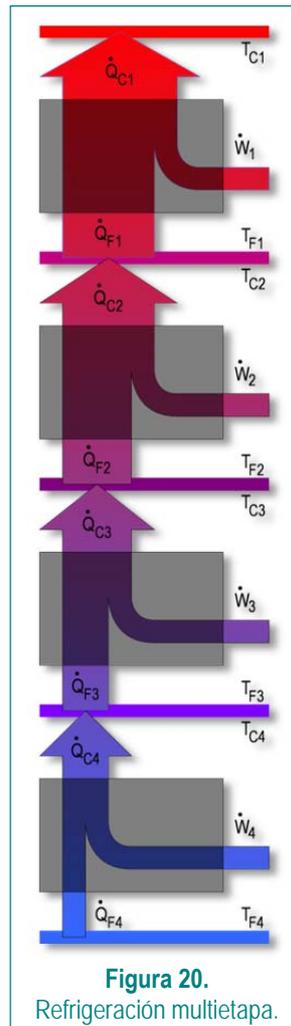
Los sistemas en cascada también se pueden emplear cuando la temperatura mínima que se pretende alcanzar se encuentre **muy cerca de la mínima posible del refrigerador**.

El diseño óptimo de un refrigerador termoeléctrico de varias etapas no es sencillo puesto que **la figura de mérito de la primera etapa será diferente de la figura de mérito de cualquier otra**, ya que la temperatura media será distinta. No obstante, se puede hacer una pequeña discusión en un caso general.

En la figura 20 se ha representado un sistema de refrigeración en cascada para cuatro sistemas frigoríficos.

Supongamos un refrigerador Peltier multietapa (en cascada) en el que hay **n etapas**, siendo la etapa n -ésima la que funciona a **menor temperatura**. Entonces **la etapa i -ésima ($i \leq n$) debe tener una potencia de enfriamiento que será la suma de las potencias de enfriamiento y las potencias eléctricas empleadas en la etapa $n, n-1, \dots, e i$** . La etapa 1 tendrá una potencia de enfriamiento igual a la suma de todas las potencias de eléctricas de todas las etapas inferiores más la de enfriamiento de la etapa n , es decir,

$$\dot{Q}_{F1} = \dot{Q}_{Fn} + \sum_2^n \dot{W}_i$$



El coeficiente de operación de la etapa i , COP_i , será

$$COP_i = \frac{\dot{Q}_{Fi}}{\dot{W}_i}$$

Como

$$\dot{Q}_{Ci} = \dot{W}_i + \dot{Q}_{Fi} \Rightarrow \dot{W}_i = \dot{Q}_{Ci} - \dot{Q}_{Fi}$$

sustituyendo en la expresión de COP_i , resulta

$$\text{COP}_i = \frac{\dot{Q}_{Fi}}{\dot{W}_i} = \frac{\dot{Q}_{Fi}}{\dot{Q}_{Ci} - \dot{Q}_{Fi}} \Rightarrow \frac{1}{\text{COP}_i} = \frac{\dot{Q}_{Ci} - \dot{Q}_{Fi}}{\dot{Q}_{Fi}} \Rightarrow \frac{1}{\text{COP}_i} = \frac{\dot{Q}_{Ci}}{\dot{Q}_{Fi}} - 1 \Rightarrow \frac{\dot{Q}_{Ci}}{\dot{Q}_{Fi}} = 1 + \frac{1}{\text{COP}_i}$$

De esta forma, se puede escribir

$$\prod_1^n \frac{\dot{Q}_{Ci}}{\dot{Q}_{Fi}} = \prod_1^n \left[1 + \frac{1}{\text{COP}_i} \right] = \frac{\dot{Q}_{C1}}{\dot{Q}_{F1}} \times \frac{\dot{Q}_{C2}}{\dot{Q}_{F2}} \times \dots \times \frac{\dot{Q}_{Cn}}{\dot{Q}_{Fn}}$$

Y como

$$\dot{Q}_{C(i+1)} = \dot{Q}_{Fi}$$

la expresión anterior resulta

$$\prod_1^n \frac{\dot{Q}_{Ci}}{\dot{Q}_{Fi}} = \prod_1^n \left[1 + \frac{1}{\text{COP}_i} \right] = \frac{\dot{Q}_{C1}}{\dot{Q}_{Fn}}$$

Considerando la máquina multietapa como una sola cuyo coeficiente de operación sea COP, quedará

$$\frac{\dot{Q}_{C1}}{\dot{Q}_{Fn}} = 1 + \frac{1}{\text{COP}} \Rightarrow \frac{1}{\text{COP}} = \frac{\dot{Q}_{C1}}{\dot{Q}_{Fn}} - 1 \Rightarrow \text{COP} = \frac{1}{\frac{\dot{Q}_{C1}}{\dot{Q}_{Fn}} - 1}$$

Y sustituyendo el cociente de las **potencias intercambiadas en forma de calor**,

$$\text{COP} = \frac{1}{\prod_1^n \left[1 + \frac{1}{\text{COP}_i} \right] - 1} \Rightarrow \text{COP} = \left\{ \prod_1^n \left[1 + \frac{1}{\text{COP}_i} \right] - 1 \right\}^{-1}$$

Supongamos, por hacernos una idea de la calidad del COP global obtenido, que todos los COP_i **fuesen iguales**. En ese caso, el COP global valdría

$$\text{COP} = \left\{ \left[1 + \frac{1}{\text{COP}_i} \right]^n - 1 \right\}^{-1}$$

Así, por ejemplo, cuando COP_i fuese 5, con 2 refrigeradores Peltier, COP sería 2.27. Si se disponen 3 refrigeradores Peltier de COP_i = 5, el COP global es 1.37. Si n = 4, COP = 0.93. Si n = 5, COP = 0.67. En COP es significativo por cuanto supone que para producir el mismo efecto frigorífico pero a más baja temperatura se necesita consumir muchísima más potencia eléctrica.

Esto ocurre, por ejemplo, en las **espiras de superconductores** empleadas en usos como el tren bala levitante de Japón. Para que en la espira se mantenga una corriente eléctrica superconductor es necesario disminuir su temperatura por debajo de la crítica para la superconducción, y esto sólo puede hacerse a expensas de sistemas Peltier que necesitan, tal y como se ve, muchísima energía eléctrica para funcionar. De ahí una de las grandes necesidades de energía eléctrica de Japón.

En los refrigeradores de varias etapas se suele presentar, como característica común, la forma **piramidal**. La etapa i-ésima consiste en no más de una o dos unidades termoeléctricas. Entonces, si la misma intensidad de corriente pasa a través de todos ellos las etapas siguientes irán aumentando el número de termopares con el fin de bombear la mayor cantidad de calor que va teniendo que ser transmitido.

La refrigeración multietapa con módulos Peltier cobra **utilidad** cuando se pretenden conseguir **temperaturas muy bajas** a las que con los sistemas tradicionales de frío por compresión no podrían llegar por congelarse el fluido que empleasen como fluido de ciclo.

2.8 Generación termoeléctrica.

Una **ventaja** clara que puede aportar un sistema termoeléctrico frente a un sistema de frío por compresión es la **reversibilidad en su funcionamiento**, es decir, **el mismo módulo que sirve para refrigerar se puede emplear, cuando las circunstancias lo permitan, para generar directamente energía eléctrica**.

Supongamos que se conecta una carga en forma de **resistencia eléctrica**, R_L , a un módulo Seebeck. Una fuente suministra calor al módulo de forma que en él se mantiene una diferencia de temperaturas $T_C - T_F$. La **fuerza electromotriz producida por el módulo como generador** es $(\alpha_p - \alpha_n)(T_C - T_F)$. De esta forma, la intensidad de corriente será

$$I = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)(T_C - T_F)}{(R_L + R)}$$

donde R es la resistencia eléctrica interna del módulo.

Por tanto, la **potencia útil** en la resistencia R_L vendrá dada por

$$\dot{W} = \left[\frac{(\alpha_p - \alpha_n)(T_C - T_F)}{(R_L + R)} \right]^2 R_L$$

Consideremos ahora el **calor aportado por unidad de tiempo** al módulo. La mayor parte de este calor evoluciona hacia la fuente fría por las ramas del módulo, pero una parte se emplea para **equilibrar el efecto de Peltier** asociado al flujo de corriente. Además, al igual que para el caso de la refrigeración termoeléctrica existe un **calentamiento por efecto Joule adicional**. Incluyendo todos estos términos resulta para el calor intercambiado por unidad de tiempo,

$$\dot{Q}_C = K(T_C - T_F) + (\alpha_p - \alpha_n)IT_F - \frac{I^2R}{2}$$

Así, el **rendimiento**, que viene dado por el cociente entre la potencia generada y el calor absorbido por unidad de tiempo resultará

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_C} = \frac{\left[\frac{(\alpha_p - \alpha_n)(T_C - T_F)}{(R_L + R)} \right]^2 R_L}{K(T_C - T_F) + (\alpha_p - \alpha_n)IT_F - \frac{I^2R}{2}}$$

Según esta ecuación, el **valor del rendimiento** depende en gran medida de la forma en que la **resistencia R se equipare a R_L** , ya que cuando los valores de ambas se aproximen, el numerador de la ecuación tenderá a maximizarse. Sin embargo, el **Segundo Principio de la Termodinámica restringe** el máximo valor del rendimiento a $(T_C - T_F) / T_C$, quedando reducido éste a su 50% aproximadamente por el efecto de las irreversibilidades. De cualquier forma, será conveniente, como se ve, **seleccionar la resistencia de carga para obtener el máximo rendimiento**. Si se hace $m = R_L / R$, resulta, para el calor intercambiado por unidad de tiempo

$$\dot{Q}_C = K(T_C - T_F) + (\alpha_p - \alpha_n)IT_F - \frac{I^2R_L}{2m}$$

Si se deriva esta ecuación y se iguala a cero, se encuentra un **mínimo** para el valor de este calor intercambiado por unidad de tiempo (se omiten los detalles matemáticos del razonamiento). En este mínimo, el valor de m es M y vale

$$M = \sqrt{1 + ZT_M}$$

donde Z es la figura de mérito y T_M es la temperatura media entre T_C y T_F . Así, cuando la relación entre las dos resistencias R_L y R es M , el rendimiento es

$$\eta = \left(1 - \frac{T_F}{T_C}\right) \left(\frac{M-1}{M + T_F/T_C}\right)$$

De esta expresión se desprende que **el rendimiento máximo se degrada** según el factor

$$\frac{M-1}{M + T_F/T_C}$$

Este valor de este factor **disminuye a medida que M aumenta**. Como M depende de las temperaturas de las fuentes y de Z puede concluirse que la misma figura de mérito puede asumirse tanto en refrigeración como en generación.

3 EVALUACIÓN DE UN SISTEMA CONVENCIONAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN EN UN VEHÍCULO.

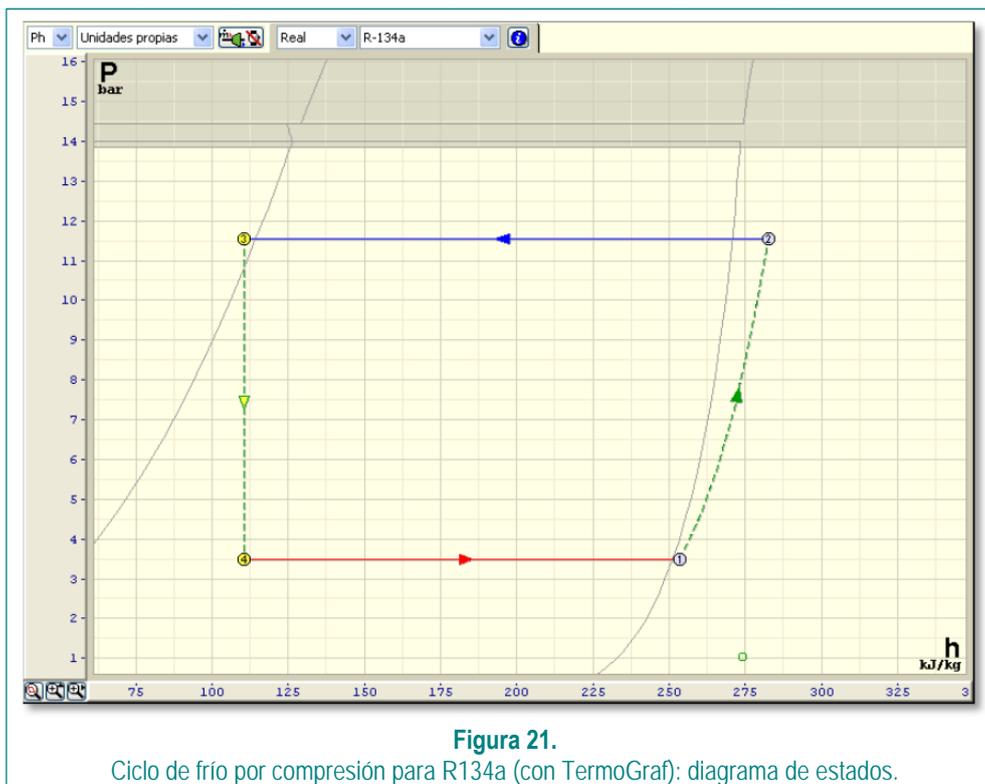
3.1 *Coefficiente de operación en refrigeración por compresión.*

Una vez está caracterizado el **sistema de frío** en lo que se refiere a presiones en los intercambiadores de calor y estados de entrada y salida de cada elemento, tal y como se ha indicado en el apartado 2.1, se puede hacer un cálculo aproximado de las cantidades energéticas intercambiadas a partir de las entalpías del refrigerante empleado.

El **refrigerante más extendido** en los sistemas de frío por compresión empleados en Automoción es el **R134a**. En una primera aproximación se pueden emplear Tablas de Propiedades Termodinámicas para la determinación de las entalpías de cada estado.

Sin embargo, existen herramientas mucho más modernas y eficaces no ya sólo para la determinación de Propiedades Termodinámicas, sino para el **análisis de ciclos termodinámicos completos**.

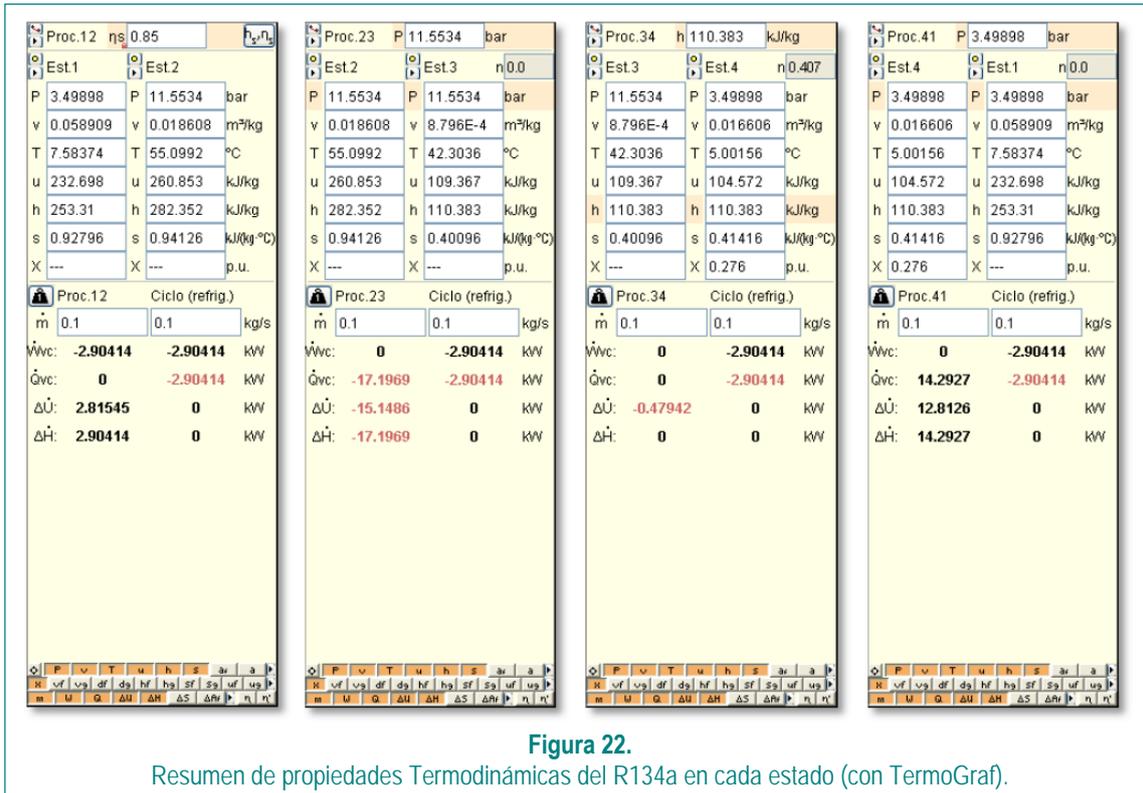
Una de ellas es el Programa **Termograf**, desarrollado en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza, cuyos resultados se presentan en las Figuras 21 y 22.



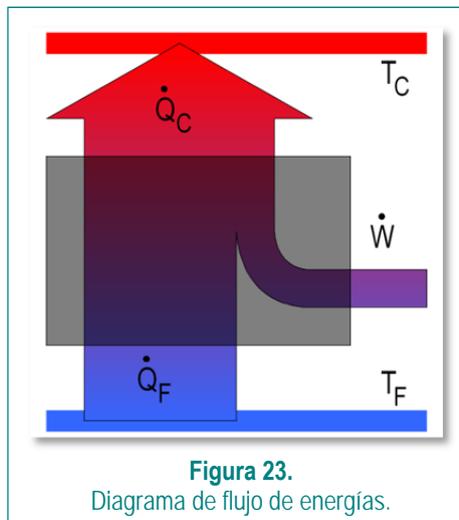
El problema se ha **resuelto**, pues, con Termograf de la siguiente forma: se han fijado las temperaturas en el evaporador y en el condensador partiendo de las temperaturas de sus entornos. Se han fijado las presiones en los intercambiadores. Se ha atribuido un ligero recalentamiento al vapor a la salida del evaporador y un ligero subenfriamiento al líquido a la salida del condensador.

Con un rendimiento global de compresor del 85% (intencionadamente bajo para incluir al rendimiento mecánico) se obtienen en Termograf las entalpías del refrigerante en cada estado del ciclo.

La figura 22 muestra un **resumen de las propiedades termodinámicas** del refrigerante en cada uno de los estados del ciclo.



En la Figura 23 se dibuja el **diagrama de flujo de energías** que permite un cálculo sencillo del coeficiente de operación del sistema en su funcionamiento tanto como sistema de refrigeración como en bomba de calor.



El coeficiente de operación mide la relación entre lo que se obtiene y lo que se da. En bomba de calor lo obtenido es el calor aportado al foco caliente y en sistema de refrigeración, el calor extraído de la fuente fría. En ambos casos, al sistema hay que aportarle **potencia útil**, por lo que en ambos casos el denominador en la expresión del coeficiente de operación es el mismo, es decir

$$\text{COP}_{\text{BQ}} = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{W}_C} = \frac{\dot{m}_{\text{R134a}}(h_2 - h_3)}{\dot{m}_{\text{R134a}}(h_2 - h_1)} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad \text{y} \quad \text{COP}_{\text{SR}} = \frac{\dot{Q}_F}{\dot{W}_C} = \frac{\dot{m}_{\text{R134a}}(h_1 - h_4)}{\dot{m}_{\text{R134a}}(h_2 - h_1)} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

Sustituyendo las entalpías obtenidas en Termograf se obtiene

$$\text{COP}_{\text{BQ}} = 5.92 \quad \text{y} \quad \text{COP}_{\text{SR}} = 4.92$$

Todos estos parámetros se utilizarán más adelante para evaluar la posibilidad de utilización de nuevas tecnologías en la refrigeración del habitáculo de un automóvil.

3.2 Análisis de necesidades a partir de la tecnología actual.

Una cuestión que aún queda pendiente antes de entrar en el análisis de necesidades es el **flujo másico** de refrigerante en el sistema de frío. Para su determinación nos remitiremos a la **potencia habitualmente consumida por el compresor** de un sistema de frío comúnmente empleado en automoción.

La Figura 24 aporta una curva que representa los requerimientos de potencia para el compresor, en kW (curva AIR COND), en función de la velocidad de giro del cigüeñal, en rpm, para un vehículo de pasajeros.

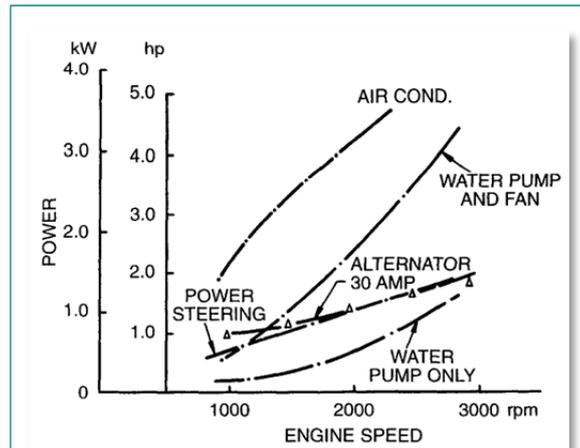


Figura 24.

Requerimientos de potencia de accesorios.
(Theory of ground vehicles. Wong, J.).

De la gráfica se desprende el **orden de magnitud** en que se encuentra la potencia consumida por el compresor. Para hacer cálculos aproximados se estimará ésta en unos 3 kW. Empleando la ecuación de la potencia del compresor se obtiene el flujo másico de refrigerante como

$$\dot{m}_R = \frac{\dot{W}_C}{h_1 - h_{2s}} \eta_C$$

una potencia de unos 3 kW se ha calculado el flujo másico de refrigerante a partir de las propiedades termodinámicas que aporta Termograf. De esta forma, se ha obtenido un **flujo másico de refrigerante** de 0.1 kg/s. A partir del flujo másico de refrigerante así obtenido, del programa se obtienen las propiedades que permiten el **cálculo de los calores transferidos por unidad de tiempo en los intercambiadores**, resultando los siguientes valores:

$$\dot{Q}_F = 14.7642 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_C = -17.7642 \text{ kW}$$

El signo "-" en el calor intercambiado en el condensador indica que es calor cedido por el fluido en el condensador. Así pues, las **necesidades de frío en el habitáculo** se estiman en torno a 15 kW.

4 EVALUACIÓN DE UN SISTEMA TERMOELÉCTRICO PARA CLIMATIZACIÓN EN UN VEHÍCULO.

4.1 Comparación entre coeficientes de operación y atención a necesidades energéticas con sistemas termoeléctricos.

Como se vio en el apartado 2.6, el **coeficiente de operación** para la **intensidad de corriente eléctrica que lo hace máximo** es

$$\text{COP}_{\max} = \frac{T_F \left[\sqrt{1 + ZT_M} - \frac{T_C}{T_F} \right]}{(T_C - T_F) \left[\sqrt{1 + ZT_M} + 1 \right]}$$

Si en la ecuación del COP para sistemas de refrigeración termoeléctrica sustituimos las temperaturas por las que utilizamos para el refrigerante en el ciclo de frío por compresión y dejamos la expresión en función de Z podremos obtener una **comparación para ambos COP**. Recordemos que para el ciclo de frío por compresión, éste resultaba ser 4.92.

Pues bien: haciendo $T_F = 278 \text{ K}$ (= 5 °C) y $T_C = 328 \text{ K}$ (= 55 °C) resulta, para $Z = 3 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ (valor propuesto en la Bibliografía más especializada y sobre el que más adelante se incide), $\text{COP}_{\max} = 0.47$. Por tanto, con un material que tuviese una figura de mérito de $3 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ sería **muy desventajosa** su utilización como refrigerador con respecto al sistema de frío por compresión de vapor.

Efectivamente si, tal y como se ha visto, se necesitan aproximadamente 15 kW para refrigerar el habitáculo de un vehículo, con un COP de aproximadamente 0.5 se necesitaría una potencia eléctrica de

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_F}{\dot{W}} \Rightarrow \dot{W} = \frac{\dot{Q}_F}{\text{COP}} \Rightarrow \dot{W} = \frac{15 \text{ kW}}{0.5} = 30 \text{ kW}$$

que es unas **diez veces más que la que requiere un compresor de un sistema de frío por compresión** en la actualidad.

Por otro lado, para atender a la demanda de frío en el habitáculo (15 kW), si se emplean módulos con una potencia de refrigeración de aproximadamente 100 W, se necesitarían 150 unidades.

Cabe preguntarse, pues, **a partir de qué valor de la figura de mérito la refrigeración termoeléctrica es interesante en cuanto al COP**, al menos en Automoción. Esta pregunta no puede responderse sin fijar valores para las dos temperaturas de intercambio de calor.

Por comparar, haciendo $T_F = 278 \text{ K}$ (= 5 °C) y $T_C = 328 \text{ K}$ (= 55 °C) resulta, para COP_{\max} en función de Z,

$$\text{COP}_{\max} = \frac{278 \text{ K} \left[\sqrt{1 + 303 \text{ K Z}} - \frac{328 \text{ K}}{278 \text{ K}} \right]}{(328 \text{ K} - 278 \text{ K}) \left[\sqrt{1 + 303 \text{ K Z}} + 1 \right]}$$

Si se representa **COP_{max} en función de Z** se obtiene una gráfica como la de la Figura 25. En ella se ha representado una línea recta que corresponde al COP obtenido con anterioridad en el sistema de frío por compresión.

De la gráfica se desprende que como sistema de frío, la refrigeración termoeléctrica empieza a ser competitiva (en lo que a COP se refiere), en nuestro caso en particular, empleando materiales cuyo valor de Z se encuentre en las proximidades de 0.16, que es la abscisa que corresponde al punto de corte de las dos curvas (P).

Para cada caso particular, en lo que a temperaturas se refiere, es necesario hacer un análisis similar.

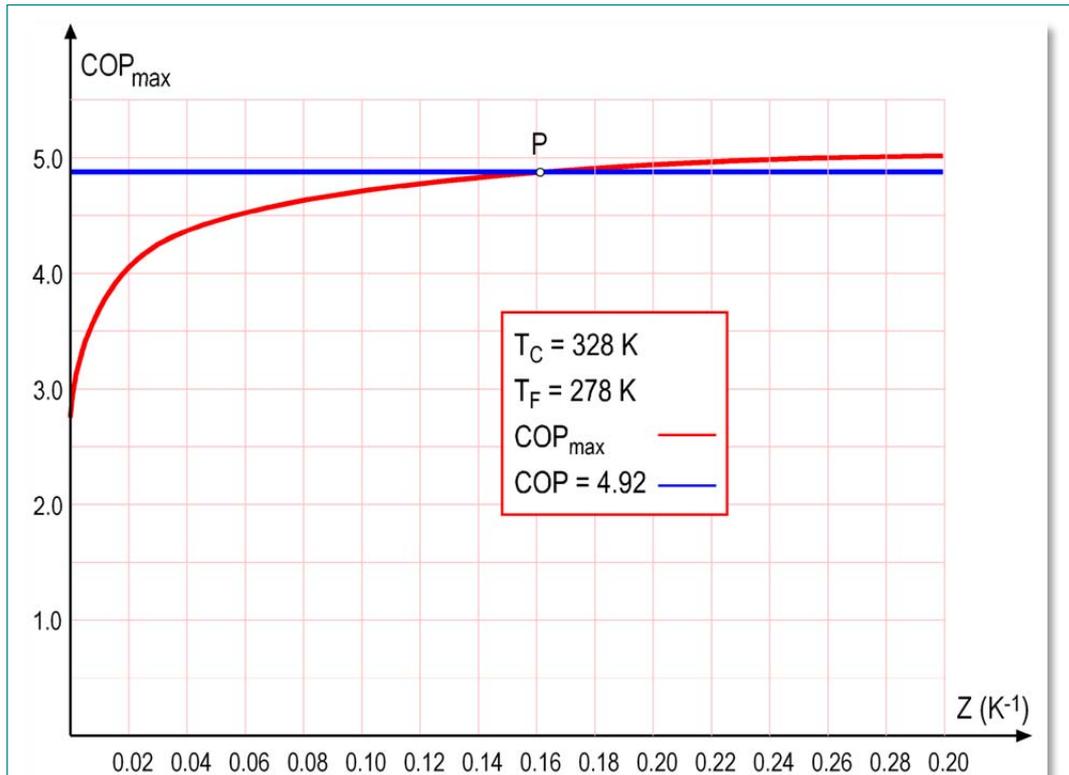


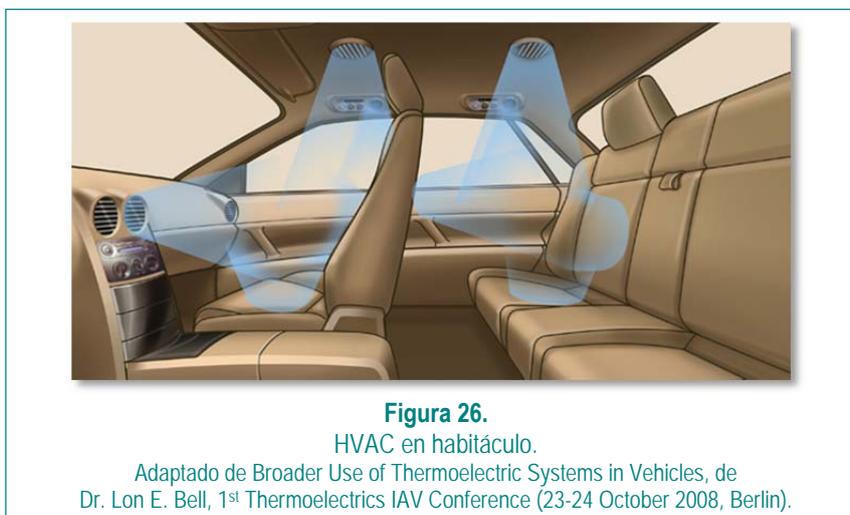
Figura 25.

Comparación entre el COP de un sistema de frío por compresión y el COP_{max} de un sistema de frío termoeléctrico.

A la vista de la gráfica se desprende que a partir de figuras de mérito superiores a 0.16, los sistemas termoeléctricos pueden proporcionar valores de COP **incluso superiores** al obtenido para sistemas de refrigeración por compresión.

4.2 Utilización actual de los sistemas termoeléctricos en HVAC en automóviles.

El acrónimo **HVAC** significa “**H**eating, **V**entilating, and **A**ir **C**onditioning”, es decir, “**C**alefacción, **V**entilación y **A**condicionamiento del Aire”.



La calefacción y refrigeración del habitáculo tal y como la venimos conociendo hasta ahora **es altamente ineficiente**. Aunque cualquier nueva forma de HVAC en el automóvil tendrá que satisfacer

las necesidades de confort, se hace necesario **ajustar los consumos energéticos** en tanto no se desarrollen más las tecnologías que permitan el nivel actual.

Existen, en la actualidad, algunos fabricantes que **disponen ya en el mercado de tecnologías Termoeléctricas para HVAC**. Uno de ellos es **Amerigon**, que comercializa tanto sistemas de HVAC **integrales de habitáculo** como de **asiento**. De momento el sistema HVAC integral está en **fase de desarrollo**.

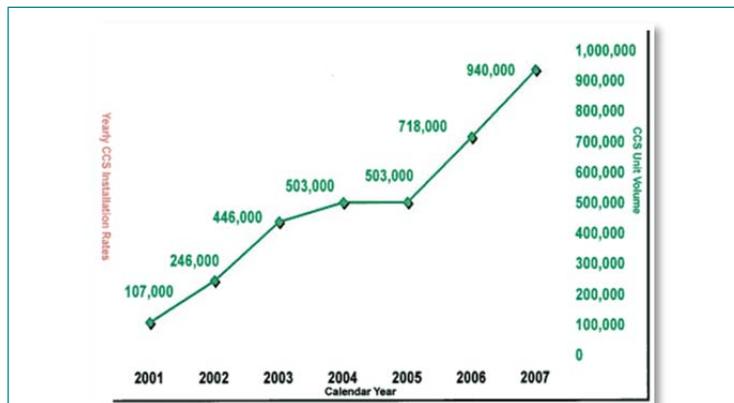


Figura 27.
 Evolución de sistemas CCS instalados hasta 2007.
 Adaptado de Broader Use of Thermoelectric Systems in Vehicles, de Dr. Lon E. Bell, 1st Thermoelectrics IAV Conference (23-24 October 2008, Berlin).

En el proyecto participa el Departamento de Energía de EE.UU., corriendo su dirección a cargo de Ford Motor Company y participando como socios Visteon (proveedor global de sistemas para automoción), el Laboratorio Nacional de Energías Renovables y la Universidad Estatal de Ohio. En el proyecto se enfatiza la versatilidad de los sistemas termoeléctricos para el HVAC individual.

Desde el año 2000 muchas marcas conocidas de automóviles han venido mostrando interés por la **HVAC individual de asiento**, que en la actualidad se encuentra **más desarrollada**.

El sistema emplea **dos módulos TE por asiento**, uno en su parte **inferior** y otro en el **respaldo**, de modo que aportan calefacción, frío y ventilación a su ocupante. El mercado para los sistemas CCS está claramente en aumento, como se aprecia en la Figura 28.

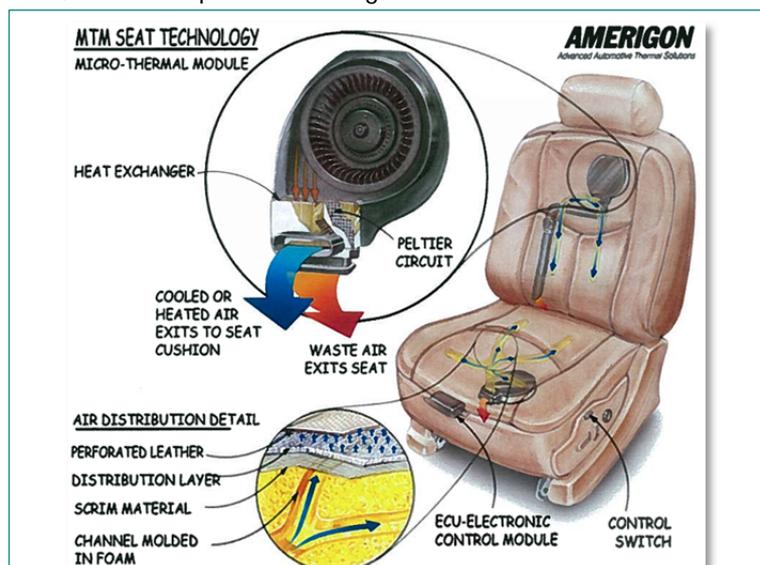
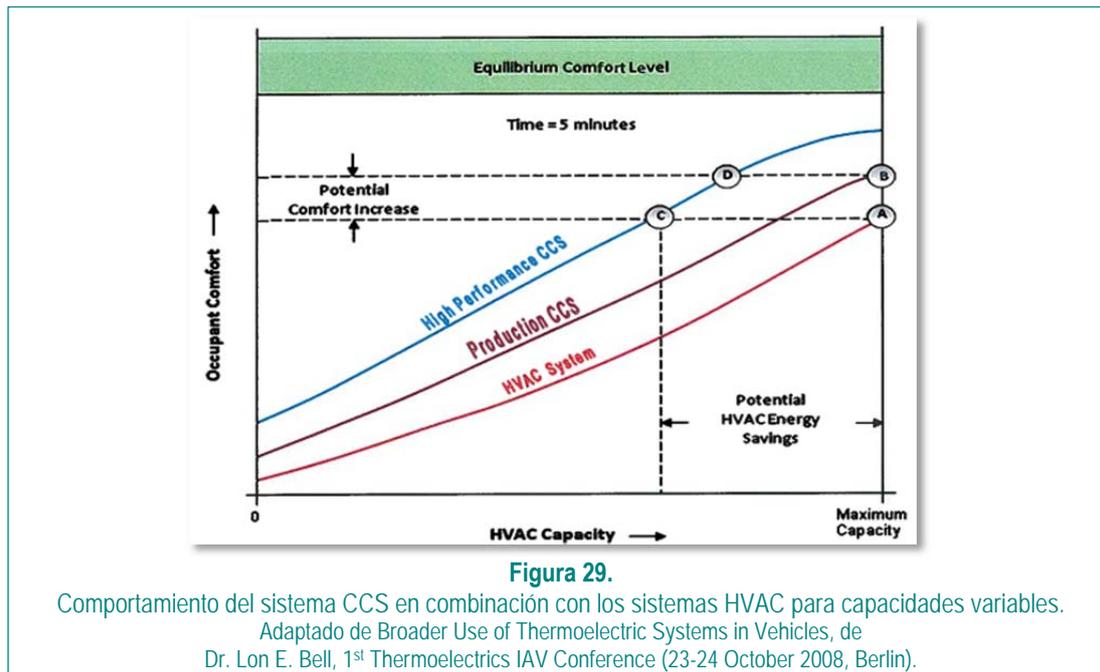


Figura 28.
 Sistema de Control de Climatización en Asiento (CCS).
 Adaptado de Broader Use of Thermoelectric Systems in Vehicles, de Dr. Lon E. Bell, 1st Thermoelectrics IAV Conference (23-24 October 2008, Berlin).

El sistema CCS se integra perfectamente en los asientos y aporta confort personal real, permitiendo **ajustar el dispositivo a gusto de cada ocupante**. Resulta fácilmente integrable en el control de todo

el vehículo y su consumo es muy bajo (entre 40 y 60 W por ocupante), en comparación con otros sistemas de refrigeración.

En cuanto a la **evolución del confort individual en 5 minutos** se representa la gráfica de la Figura 29.



La **línea de base** representa el **confort de un sistema tradicional HVAC** a unos cinco minutos después de su conexión en un día cálido con una temperatura exterior superior a 35 °C. A los cinco minutos el sistema tradicional HVAC ha comenzado a aumentar el confort del ocupante pero el confort total aún no ha sido alcanzado.

El eje horizontal representa la **potencia aportada por el sistema HVAC** como una fracción de su capacidad máxima. El eje vertical representa el grado de confort alcanzado. En la zona verde se encuentra el **confort óptimo común a todos**.

Desde el instante del encendido en cinco minutos **no hay tiempo suficiente para alcanzar el confort total en HVAC tradicional (Punto A)**. Añadiendo un sistema CCS se **incrementa** el confort desde el Punto A hasta el Punto B. Un sistema CCS de alto rendimiento (actualmente en desarrollo) incrementaría el confort como se muestra en la curva azul.

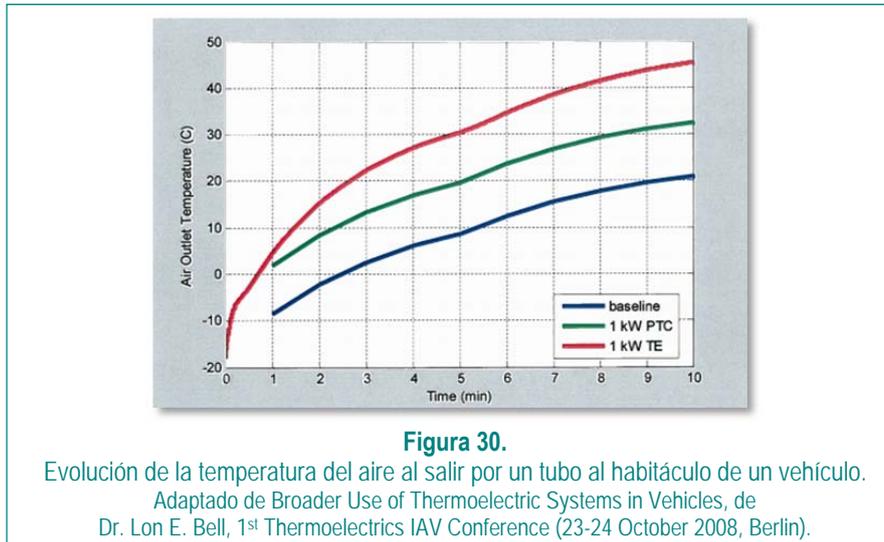
Una **opción** disponible para los fabricantes consistiría en emplear **sistemas CCS de alto rendimiento** para aportar el mismo confort que los HVAC tradicionales, **reduciendo el tiempo de confort** al alcanzarse el mismo nivel en el Punto C, lo que supondría, además, una **reducción del consumo energético global**.

Una condición de operación alternativa es la que se indica en el Punto D, que prorrataría la **mejora del rendimiento entre el confort del ocupante** y la **reducción de la utilización del sistema HVAC**. Este rendimiento requeriría la **integración de la refrigeración CCS con la del sistema HVAC**, lo cual podría controlarse fácilmente ya que la señal de salida del sistema CCS y la potencia del sistema TE están controlados eléctricamente.

Pero la **novedad** más importante **a corto plazo** es la utilización de los sistemas TE como **suplemento de calefacción** en los arranques en frío. Inviertiendo la intensidad de corriente en un sistema TE de refrigeración se produce calor. Los sistemas TE se comportan, como se ha visto, como bombas de calor con coeficientes de operación de entre 2 y 3, lo que les convierte en sistemas muy atractivos desde el punto de vista de su utilización como **calefactores**, en detrimento de los **calefactores por resistencias**, ya que de ellos sólo cabe esperar un coeficiente de operación 1.

En la Figura 30 se representa la **evolución de la temperatura del aire al salir por un tubo al habitáculo** de un vehículo diesel europeo pequeño en un día en el que la temperatura externa es $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Las resistencias calefactoras (PTC) **elevan la temperatura** del aire del habitáculo en torno a unos $11\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bajo las mismas condiciones y **con el mismo consumo eléctrico** un sistema TE eleva la temperatura entre $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $24\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que reduce notablemente el tiempo de confort.



Nuevamente, al igual que para la refrigeración, se alcanza antes el tiempo de confort y, además, se reduce notablemente el consumo de potencia.

4.3 Generación termoeléctrica.

Como se vio en el apartado 2.8, el **rendimiento en un generador termoeléctrico** es

$$\eta = \left(1 - \frac{T_F}{T_C}\right) \left(\frac{M-1}{M+T_F/T_C}\right)$$

siendo el **factor de degradación**

$$\frac{M-1}{M+T_F/T_C}$$

y

$$M = \sqrt{1 + ZT_M}$$

Los materiales utilizados habitualmente en Termoelectricidad tienen valores para ZT_M que se encuentran **próximos a la unidad**, como se ha visto, a las temperaturas habituales de uso. Si $ZT_M = 1$, $M = 2^{1/2} = 1.4142$. El factor de degradación del rendimiento depende, aún con todo, del cociente de temperaturas T_F / T_C .

Para un generador que trabajase entre fuentes a temperaturas próximas este cociente **se encontraría cercano a la unidad** y, en este caso, operando en el factor de degradación, éste tomaría un valor próximo a 0.1716, lo que daría un rendimiento al generador de tan sólo el 17.16% del máximo. Si se duplica la temperatura de la fuente caliente, T_C , con relación a la de la fuente fría, el factor de degradación resultaría ser 0.2164, es decir, que el rendimiento sería el 21.64% del máximo.

No obstante, hay que tener en cuenta que este concepto de rendimiento se refiere al **puramente termodinámico**, como la relación entre lo obtenido y lo dado. Lo obtenido, como energía eléctrica y lo

dado, en forma de calor. Si se amplía el concepto de rendimiento y se observa el **coste del calor aportado**, rápidamente se deducirá que si el coste del calor aportado es nulo (lo que podría ocurrir si el calor se obtiene de la radiación solar incidente, por ejemplo), el **rendimiento tomará valores notablemente ventajosos**, ofreciéndose la termoelectricidad como una aplicación potencial para la obtención directa de energía eléctrica en automoción.

Si se observan los rendimientos en motores térmicos actuales y las temperaturas entre las que trabajan, por comparar, se tienen para los primeros números que rondan el 25%. Las temperaturas son variables y dependen de las condiciones en las que se realicen los procesos de combustión, pero por hacer un **cálculo en órdenes de magnitud**, podríamos suponer que la reacción de combustión se produce a 1500 K. Si la temperatura del ambiente es 300 K en estas condiciones un generador termoeléctrico tendría un factor de degradación de

$$\frac{\sqrt{2}-1}{\sqrt{2}+\frac{300\text{ K}}{1500\text{ K}}}=0.2566$$

con lo que el rendimiento, a partir de la expresión,

$$\eta = \left(1 - \frac{T_F}{T_C}\right) \left(\frac{M-1}{M+T_F/T_C}\right)$$

sería

$$\eta = \left(1 - \frac{300\text{ K}}{1500\text{ K}}\right) \times 0.2566 = 0.2053 = 20.53\%$$

Este número se reduciría aproximadamente a la **mitad** debido a las **irreversibilidades** inherentes a todos los procesos termodinámicos reales.

Esta es otra posibilidad de uso para sistemas termoeléctricos pero no es el objeto de este Trabajo de Fin de Máster, aunque se señale por la utilidad adicional que podría aportar la utilización de este tipo de sistemas.

5 ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE SISTEMAS TERMOELÉCTRICOS Y CONVENCIONALES.

5.1 *Sistemas termoelectricos en refrigeración.*

El objetivo de este Trabajo de Fin de Máster no era la implantación de un nuevo sistema sino, como ya se ha dicho, el **estudio energético** y el **análisis de sus posibilidades** en lo que a **sustitución** de la actual tecnología de frío por compresión se refiere. No obstante, se considera de interés hacer una referencia al **precio actual de los módulos termoelectricos**.

En este apartado no se dispone de los precios en fábrica ni por compra en grandes cantidades. Tan sólo se dispone de los precios aproximados de mercado, y es muy conveniente señalar que **son muy variables de unas marcas a otras**, aun cuando el elemento (compresor, condensador o evaporador) sea el mismo. No obstante, se aportará aquí una metodología que permita el análisis de las posibilidades de la implantación de este tipo de sistemas, una vez conocidos con detalle estos datos previos.

Para los sistemas de frío por compresión se necesita un compresor, condensador (con válvula termostática) y evaporador. Se estima que el conjunto, junto con los tubos y racores necesarios, además de la carga de refrigerante, puede rondar los 1400 €.

Existiendo una gran disparidad de precios en el mercado, se pueden encontrar módulos termoelectricos de hasta 400 W por unos 20 €, con disipador de aletas incluido. Un precio de unos 5 c€/W no estaría fuera de orden de magnitud.

Así, si se pretenden obtener 15 kW de frío, la inversión en módulos termoelectricos se encontrará, aproximadamente, en unos 750 € (= 15000 W x 0.05 €/W). Este es el **coste de la instalación**, situándose ya esta cantidad en absoluta **ventaja** con relación a los sistemas de frío por compresión. Como se puede apreciar, **el coste de un sistema termoelectrico está en torno a la mitad del coste de un sistema de frío por compresión**.

Sin embargo, en el momento actual, la tecnología de frío por compresión es insustituible por la tecnología de refrigeración termoelectrica. Al encontrarse el COP de los sistemas de frío por compresión en torno a algo más del doble de su valor en los sistemas de refrigeración termoelectrica, la potencia necesaria para la refrigeración a partir de módulos termoelectricos supone más del doble de la requerida por un sistema de frío por compresión.

En efecto, para aportar los 15 kW requeridos de frío con un COP de 5, característico (como se ha visto) de los sistemas de frío por compresión, se necesitarían 3 kW de potencia (= 15 kW / 5), mientras que con un COP de 2, característico de los sistemas de refrigeración termoelectrica se necesitan 7.5 kW de potencia (= 15 kW / 2).

Si la energía necesaria se obtiene de la almacenada en la batería, en cada hora de funcionamiento del sistema se consumirían, para el sistema de frío por compresión, 3 kWh, y para el sistema de refrigeración termoelectrica, 7.5 kWh. A un precio medio de 15 c€/kWh, el consumo supondría 0.45 €/h (= 3 kWh x 15 c€/kWh) en refrigeración por compresión y 1.125 €/h (= 7.5 kWh x 15 c€/kWh), en refrigeración termoelectrica.

Como se puede ver, en el estado actual de la tecnología de los semiconductores se puede decir que la diferencia en el coste de funcionamiento horario es de 1.125 €/h - 0.45 €/h = 0.675 €/h, es decir, un 250 % (= 1.125 €/h / 0.45 €/h) más caro con sistemas termoelectricos. La misma proporción que guardan los COP de ambos sistemas, obviamente.

Para un tiempo de vida media de 1000 h del sistema, resulta un coste total de funcionamiento, para el sistema de refrigeración termoelectrica, de 1125 € / 1000 h, mientras que para el sistema de frío por compresión, 450 € / 1000 h.

Queda evidenciada, pues, la **necesidad de conseguir mejores figuras de mérito que den lugar a mayores coeficientes de operación en los sistemas termoeléctricos para situarlos a un nivel competitivo.**

Sin embargo, existe un **factor que puede influir en el coste total** y que hasta aquí no se ha considerado, que es el **coste de instalación** que, como se ha visto, es notablemente más bajo en sistemas termoeléctricos. Consideremos la diferencia en el coste de instalación para el cálculo del COP competitivo a las 1000 h de uso.

Para ello, basta con introducir la diferencia en el coste de instalación en las 1000 h de funcionamiento, de modo que el coste total, de instalación y de funcionamiento, resulta ser, para el sistema de frío por compresión, $1400 \text{ €} + 450 \text{ €} = 1850 \text{ €}$. Por su parte, el coste total de instalación y operación para el sistema termoeléctrico resultará ser $750 \text{ €} + 1125 \text{ €} = 1875 \text{ €}$.

Así pues, en una vida de aproximadamente 1000 h, los costes de instalación y de funcionamiento se hacen prácticamente similares.

Cabe, pues, preguntarse **de una forma general y en función de todos los costes implicados**, tanto de instalación (C_{iFC} y C_{iTE} , respectivamente) como de funcionamiento (C_{fFC} y C_{fTE} , respectivamente) y el de la energía (C_E , en €/kWh), así como del tiempo de funcionamiento (t_F , en horas), **en cuánto tiempo de funcionamiento se llegan a igualar los costes de totales para ambos sistemas.**

La **ventaja competitiva** recaerá sobre el sistema que tenga unos costes totales menores en cada momento. **Al tiempo de funcionamiento en el que se igualan los costes de los sistemas se le llamará, en adelante, tiempo máximo de funcionamiento de la tecnología inicialmente más favorable o, simplemente, tiempo máximo de funcionamiento.** En el tiempo máximo de funcionamiento la ventaja competitiva se invierte, como se va a ver a continuación.

Los costes de funcionamiento están directamente ligados a cada COP (COP_{FC} y COP_{TE}). Tal y como se ha visto, para el sistema de frío por compresión,

$$COP_{FC} = \frac{\dot{Q}_F}{\dot{W}_{FC}} \Rightarrow \dot{W}_{FC} = \frac{\dot{Q}_F}{COP_{FC}}$$

Por su parte, para el sistema termoeléctrico,

$$COP_{TE} = \frac{\dot{Q}_F}{\dot{W}_{TE}} \Rightarrow \dot{W}_{TE} = \frac{\dot{Q}_F}{COP_{TE}}$$

Al cabo de un tiempo de funcionamiento en horas, t_F , la energía total consumida será

$$\dot{W}_{FC} t_F = \frac{\dot{Q}_F}{COP_{FC}} t_F \quad \text{y} \quad \dot{W}_{TE} t_F = \frac{\dot{Q}_F}{COP_{TE}} t_F \quad (\text{kWh})$$

Y si el coste de la energía es, como se ha dicho, C_E , resultarán unos costes de

$$C_{fFC} = \dot{W}_{FC} t_F C_E = \frac{\dot{Q}_F}{COP_{FC}} t_F C_E \quad \text{y} \quad C_{fTE} = \dot{W}_{TE} t_F C_E = \frac{\dot{Q}_F}{COP_{TE}} t_F C_E \quad (\text{€})$$

Pues bien, añadiendo los **costes de instalación** se obtienen los **costes totales para cada sistema**, es decir,

$$C_{TFC} = C_{iFC} + C_{fFC} \quad \text{y} \quad C_{TTE} = C_{iTE} + C_{fTE} \quad (\text{€})$$

y sustituyendo resulta,

$$C_{TFC} = C_{iFC} + \frac{\dot{Q}_F}{COP_{FC}} t_F C_E \quad \text{y} \quad C_{TTE} = C_{iTE} + \frac{\dot{Q}_F}{COP_{TE}} t_F C_E \quad (\text{€})$$

Se pueden **representar ambos costes totales** en un sistema de coordenadas **frente al tiempo de funcionamiento**, obteniéndose rectas como las que se presentan en la figura 31, en las que se han tomado como parámetros los anteriormente relacionados, es decir

$$C_{iFC} = 1400 \text{ €}$$

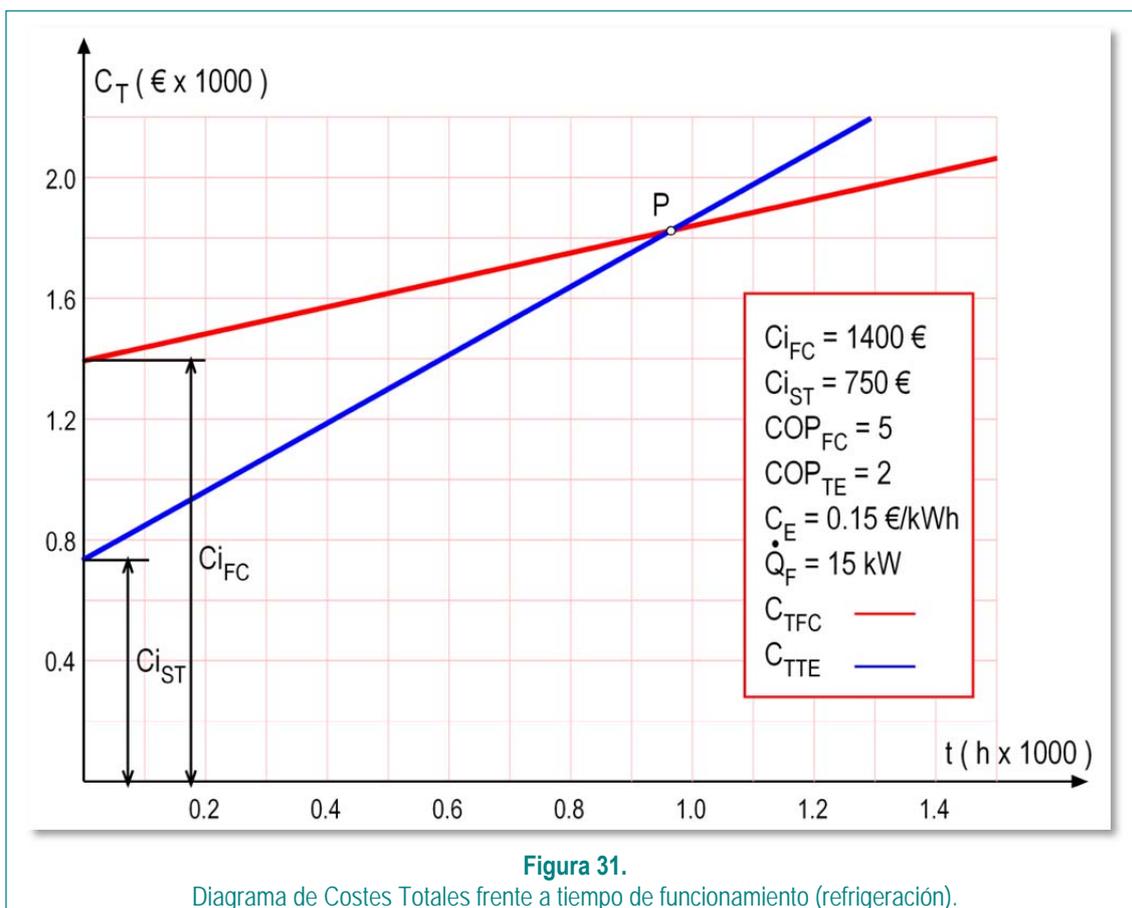
$$C_{iTE} = 750 \text{ €}$$

$$COP_{FC} = 5$$

$$COP_{TE} = 2$$

$$C_E = 0.15 \text{ € / kWh}$$

$$\dot{Q}_F = 15 \text{ kW}$$



Como se puede apreciar en la gráfica, **la ordenada en el origen representa los costes de instalación para cada sistema**. La pendiente de cada recta viene dada por

$$\frac{\dot{Q}_F}{COP_{FC}} C_E \quad \text{y} \quad \frac{\dot{Q}_F}{COP_{TE}} C_E$$

A pesar de los menores costes de instalación, **los sistemas termoeléctricos aumentan el coste de funcionamiento a un ritmo mayor que los sistemas de frío por compresión**. Es lo que se desprende del análisis de las pendientes de ambas rectas.

Al ser $COP_{FC} > COP_{ST}$, la pendiente de la recta de costes del sistema termoeléctrico es mayor que la correspondiente al sistema de frío por compresión, lo que lleva a que **ambas rectas se corten en un**

punto que delimita el tiempo máximo de funcionamiento, a partir del cual el sistema termoelectrico deja de presentar una ventaja competitiva sobre el sistema de frío por compresión, por suponer, a partir de ahí, un coste de total más elevado que el del sistema de frío por compresión.

Así pues, es interesante el conocimiento de la **abscisa** de dicho punto de corte. En general, se puede calcular simplemente asumiendo que en ese punto se cumplen las ecuaciones de ambas rectas y entonces $C_{TFC} = C_{TST}$, es decir

$$C_{i_{FC}} + \frac{\dot{Q}_F}{COP_{FC}} t_{Fmax} C_E = C_{i_{TE}} + \frac{\dot{Q}_F}{COP_{TE}} t_{Fmax} C_E$$

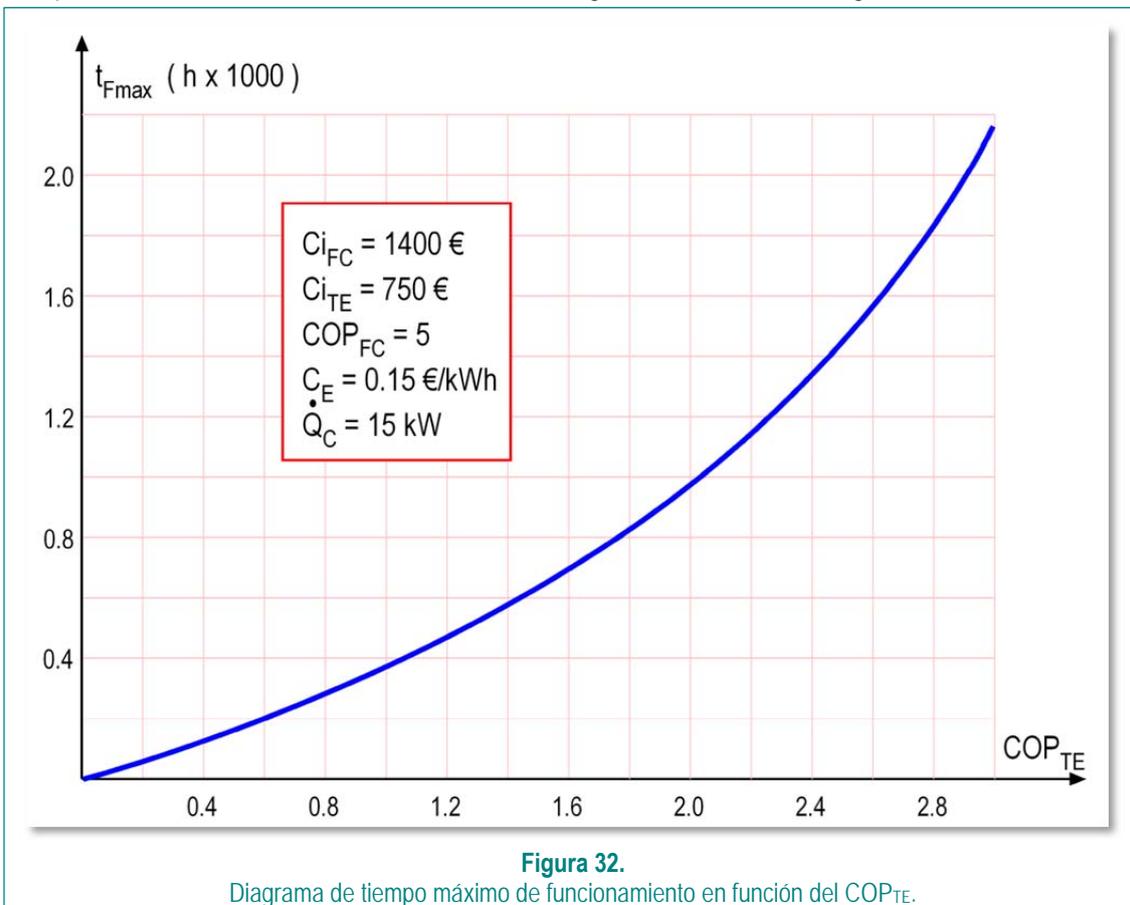
de donde, despejando, resulta

$$t_{Fmax} = \frac{C_{i_{TE}} - C_{i_{FC}}}{\dot{Q}_F C_E \left(\frac{1}{COP_{FC}} - \frac{1}{COP_{TE}} \right)}$$

Sustituyendo los valores concretos para el caso que nos ocupa resulta un tiempo máximo de 963 h.

La metodología anterior permitirá la determinación del tiempo máximo de utilización de un sistema termoelectrico en función de los costes de instalación, la potencia de refrigeración, los COP y el precio de la energía, sean cuales sean sus valores.

Si se representa t_{Fmax} frente a COP_{TE} se obtiene una gráfica como la de la figura 32.



En la Figura 32 se han tomado como parámetros para su representación

$$C_{i_{FC}} = 1400 \text{ €}$$

$$C_{i_{TE}} = 750 \text{ €}$$

$$COP_{FC} = 5$$

$$C_E = 0.15 \text{ € / kWh}$$

$$\dot{Q}_F = 15 \text{ kW}$$

De ella se desprende que **para obtener tiempos de utilización grandes no es necesario que el COP_{TE} llegue a alcanzar el valor 5**, que es el que corresponde al COP_{FC} en los sistemas actuales.

Hay que hacer notar, a partir de la expresión anterior, que un **mayor precio de la energía** (C_E) incide en el sentido de **disminuir el tiempo máximo de funcionamiento para un sistema termoeléctrico**. Cabe esperar que el tiempo máximo de funcionamiento del sistema termoeléctrico aumente, de hacerse efectiva la disminución en el precio de la energía para los **períodos de recarga de las baterías en horas valle**, previstos en el "calendario" de implantación del vehículo eléctrico.

Otro aspecto en el que se puede incidir para **aumentar el tiempo máximo de funcionamiento** es la **disminución de la potencia de refrigeración** (\dot{Q}_F). Ésta podría reducirse notablemente con el empleo de **superaislamientos** tanto en los paneles de las puertas como en el techo, suelo y cerramiento del habitáculo hacia el vano motor. Los superaislamientos no son caros, no añaden una masa notablemente grande y, por tanto, no redundan apreciablemente ni en el aumento de la energía destinada a la rodadura ni tampoco en el precio final del vehículo.

Para terminar el análisis del tiempo máximo de funcionamiento del sistema termoeléctrico, señalar una vez más la **necesidad de encontrar semiconductores con una mayor figura de mérito** para, a partir de ahí, poder construir sistemas termoeléctricos con mayores coeficientes de operación, lo que irá haciendo que el tiempo máximo de funcionamiento vaya aumentando progresivamente.

5.2 *Sistemas termoeléctricos en calefacción.*

Los cálculos se decantan más decididamente hacia los sistemas termoeléctricos en su uso como **sistemas de calefacción**, haciendo que funcionen como **bombas de calor** y **sustituyendo a las resistencias eléctricas**.

Como se ha visto, si se **invierte la polaridad** en un módulo termoeléctrico, se **invierten los sentidos de los intercambios de calor**, pasando a ser lado frío el que antes era caliente y caliente el que antes era frío.

Si se toma como potencia necesaria en forma de calor la misma que anteriormente en forma de frío (simplemente por tener una referencia), y éste se obtiene a partir de una resistencia eléctrica, toda la energía eléctrica recibida por la resistencia se transformará en ella en trabajo de rozamiento, aumentando su temperatura y desprendiendo calor hacia su entorno, como se ha visto.

Así, para la resistencia eléctrica se requerirán en cada hora 15 kWh de energía, que partiendo de energía eléctrica a un precio de 0.15 €/kWh supondrán un **coste de funcionamiento** de 2.25 €/h.

Sin embargo, si se pretende obtener esta misma energía en forma de calor con un sistema termoeléctrico funcionando como bomba de calor y con un COP = 2, se requerirá la mitad de energía eléctrica, es decir, 7.5 kW, que supondrán un **coste de funcionamiento** de 1.125 €/h, es decir, justo la mitad.

Si el COP del sistema termoeléctrico aumenta a 3, el coste de funcionamiento se reduce a un tercio y así sucesivamente.

Se puede hacer un **análisis similar al realizado en el apartado anterior**. Sean C_{TR} y C_{TE} los costes totales de instalación y de funcionamiento para cada uno de los dos sistemas de calefacción propuestos.

Para calcular los costes de funcionamiento es necesario conocer la **energía consumida por cada sistema**. Así, para las **resistencias eléctricas**, aplicando el balance de energía para sistemas cerrados en régimen estacionario se tiene

$$\dot{Q}_C = \dot{W}_R$$

donde \dot{W}_R es la potencia eléctrica consumida por la resistencia.

Por su parte, la **energía consumida por el sistema termoeléctrico funcionando como bomba de calor** vendrá dado por

$$COP = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{W}_{TE}} \Rightarrow \dot{W}_{TE} = \frac{\dot{Q}_C}{COP}$$

Es decir, el consumo energético se reduce en la proporción indicada por el COP con relación al consumo en resistencia eléctrica.

Así, los **costes de funcionamiento** de las resistencias eléctricas y del sistema termoeléctrico como bomba de calor vendrán dados por

$$Cf_R = \dot{W}_R t_F C_E \quad \text{y} \quad Cf_{TE} = \dot{W}_{TE} t_F C_E \quad (\text{€})$$

Y sustituyendo las potencias eléctricas,

$$Cf_R = \dot{Q}_C t_F C_E \quad \text{y} \quad Cf_{TE} = \frac{\dot{Q}_C}{COP} t_F C_E \quad (\text{€})$$

Si los costes de instalación del sistema a base de resistencias y del sistema termoeléctrico como bomba de calor son, respectivamente, Ci_R y Ci_{ST} , resultarán, para los costes totales

$$C_{TR} = Ci_R + Cf_R \Rightarrow C_{TR} = Ci_R + \dot{Q}_C t_F C_E \quad (\text{€})$$

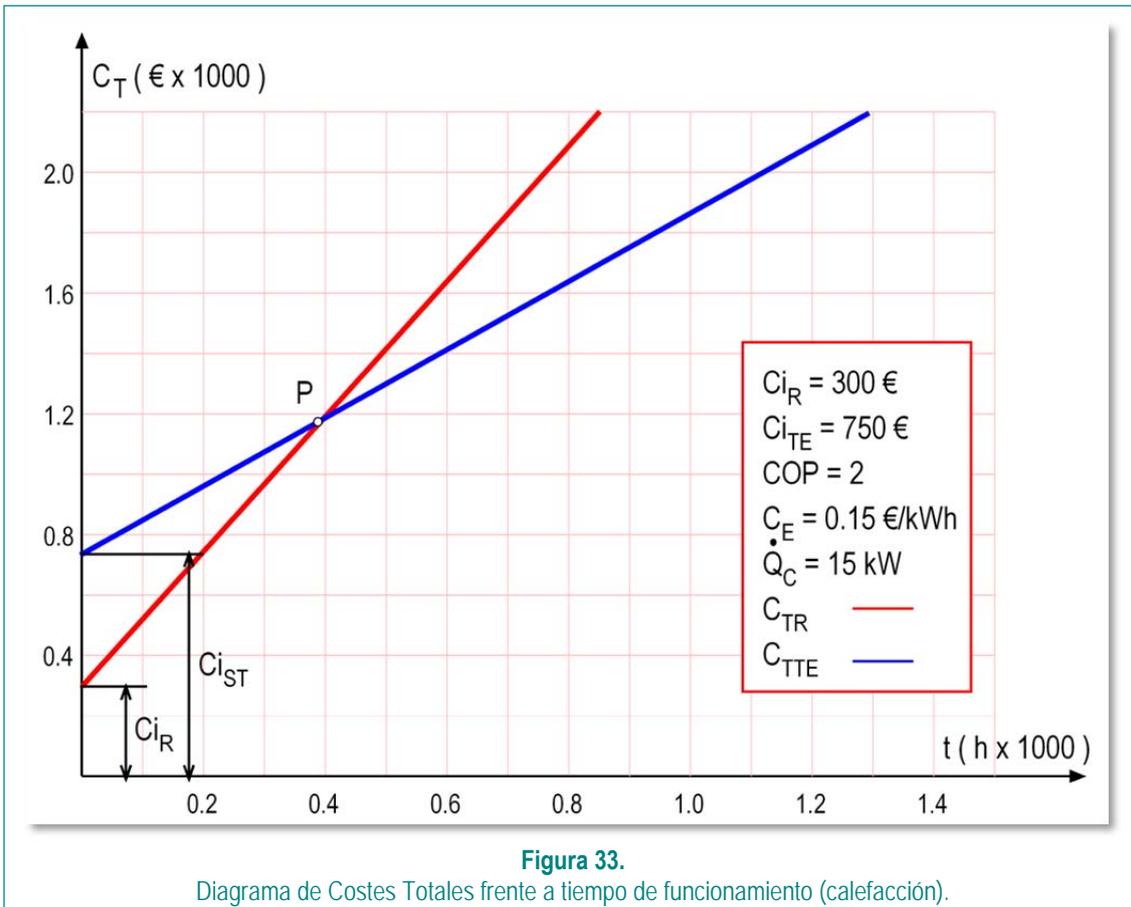
$$C_{TTE} = Ci_{TE} + Cf_{TE} \Rightarrow C_{TTE} = Ci_{TE} + \frac{\dot{Q}_C}{COP} t_F C_E \quad (\text{€})$$

Los costes de instalación de las resistencias eléctricas son **bastante variables**. Un precio de aproximadamente 300 € no está fuera de orden de magnitud.

Representando gráficamente los costes totales de cada uno de los dos sistemas en función del tiempo se obtiene una gráfica como la de la figura 33.

En ella se han tomado como parámetros los anteriormente relacionados, es decir

$$\begin{aligned} Ci_R &= 300 \text{ €} \\ Ci_{TE} &= 750 \text{ €} \\ COP &= 2 \\ C_E &= 0.15 \text{ € / kWh} \\ \dot{Q}_F &= 15 \text{ kW} \end{aligned}$$



Nuevamente se puede apreciar en la gráfica que **la ordenada en el origen representa los costes de instalación para cada sistema**. La pendiente de las curvas de costes totales para la calefacción por resistencia eléctrica y para la curva de costes totales del sistema termoeléctrico como bomba de calor vienen dadas por

$$\dot{Q}_C C_E \quad \text{y} \quad \frac{\dot{Q}_C}{\text{COP}} C_E$$

A pesar de los menores costes de instalación, **las resistencias eléctricas aumentan el coste de funcionamiento a un ritmo mayor que los sistemas termoeléctricos como bomba de calor**. Es lo que se desprende del nuevo análisis de las pendientes de ambas curvas.

Al ser $\text{COP} > 1$ (siempre es así en bombas de calor), **la pendiente de la recta de costes del sistema termoeléctrico será siempre menor que la correspondiente al sistema de calefacción por resistencia eléctrica**, lo que lleva, al igual que en el apartado anterior, a que ambas curvas se corten en un punto que delimita el tiempo máximo de funcionamiento a partir del cual **la resistencia eléctrica deja de suponer una ventaja competitiva** por suponer un coste de total más elevado que el del sistema termoeléctrico como bomba de calor.

Al igual que para el caso anterior, es interesante el conocimiento de la **abscisa de dicho punto de corte**, que igualmente se puede calcular simplemente asumiendo que en ese punto se cumplen las ecuaciones de ambas rectas y entonces $C_{TR} = C_{TST}$, es decir

$$C_{iR} + \dot{Q}_C t_{Fmax} C_E = C_{iTE} + \frac{\dot{Q}_C}{\text{COP}} t_{Fmax} C_E$$

de donde, despejando, resulta

$$t_{Fmax} = \left(\frac{COP}{COP - 1} \right) \frac{Ci_{TE} - Ci_R}{\dot{Q}_C C_E}$$

Sustituyendo los valores concretos para el caso que nos ocupa resulta un tiempo máximo de funcionamiento para la calefacción por resistencia eléctrica de 400 h.

La metodología anterior permitirá la determinación del tiempo máximo de utilización de un sistema de calefacción por resistencia eléctrica en función de los costes de instalación, la potencia de refrigeración, el COP del sistema de calefacción por bomba de calor con el que se pretende sustituir y el precio de la energía, sean cuales sean sus valores.

Cabe preguntarse cuánto valdrá el tiempo máximo de utilización si en lugar de emplearse un sistema termoeléctrico de calefacción por bomba de calor, se emplea un sistema de frío por compresión. En ese caso, siendo COP = 5 y $Ci_{FC} = 1500 \text{ €}$ (que sustituiría sin más a Ci_{TE} en la expresión de t_F y añadiendo el coste aproximado de la válvula inversora de flujo necesaria para hacer funcionar al sistema de frío como bomba de calor) resulta un tiempo máximo de funcionamiento del sistema de calefacción por resistencia eléctrica de 583 h.

Hay que hacer notar, a partir de la expresión anterior, que **un mayor precio de la energía incide en el sentido de disminuir el tiempo máximo de funcionamiento de un sistema de calefacción por resistencia eléctrica**. En cuanto a la **potencia de calentamiento**, al aumentar ésta disminuye el tiempo máximo de funcionamiento de la resistencia eléctrica.

Y en cuanto al tiempo máximo de utilización, es necesario representar su ecuación en función de COP para establecer conclusiones. Así, se obtiene la figura 34.

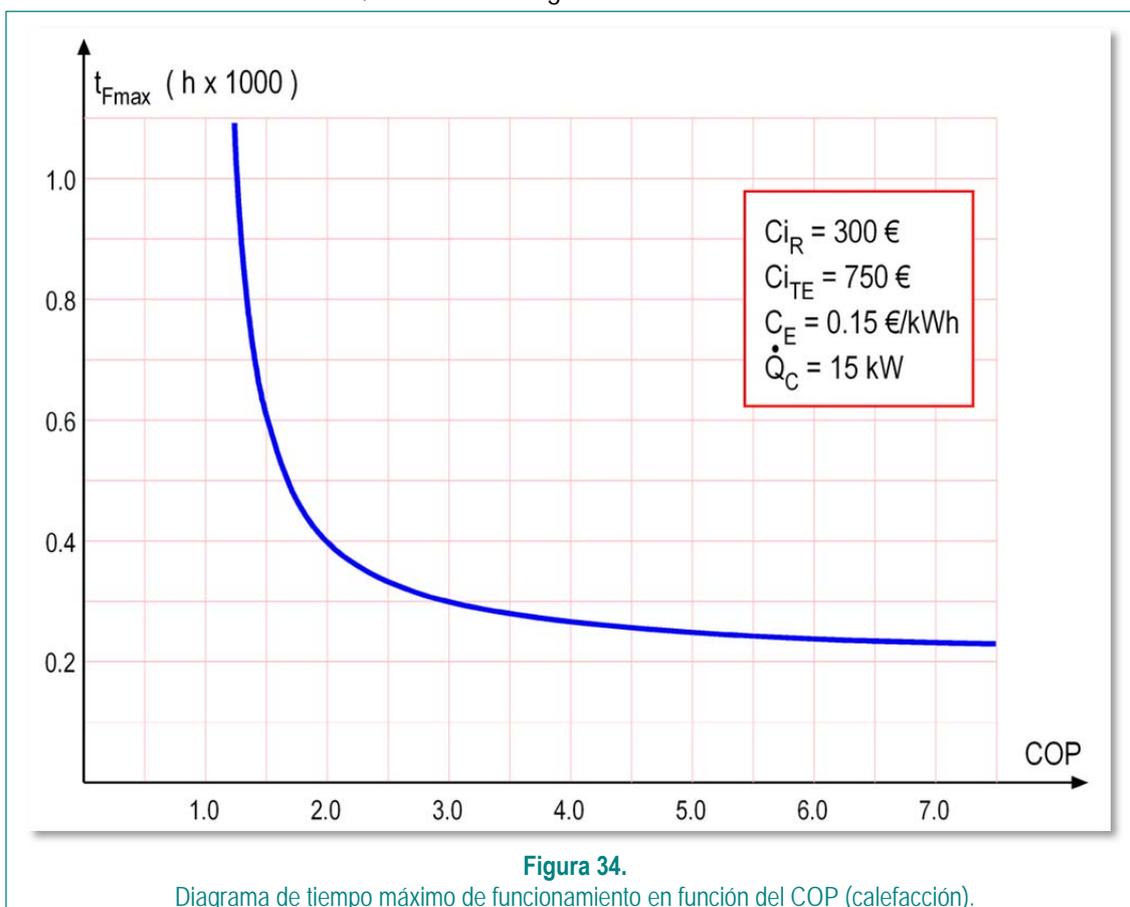


Figura 34.
 Diagrama de tiempo máximo de funcionamiento en función del COP (calefacción).

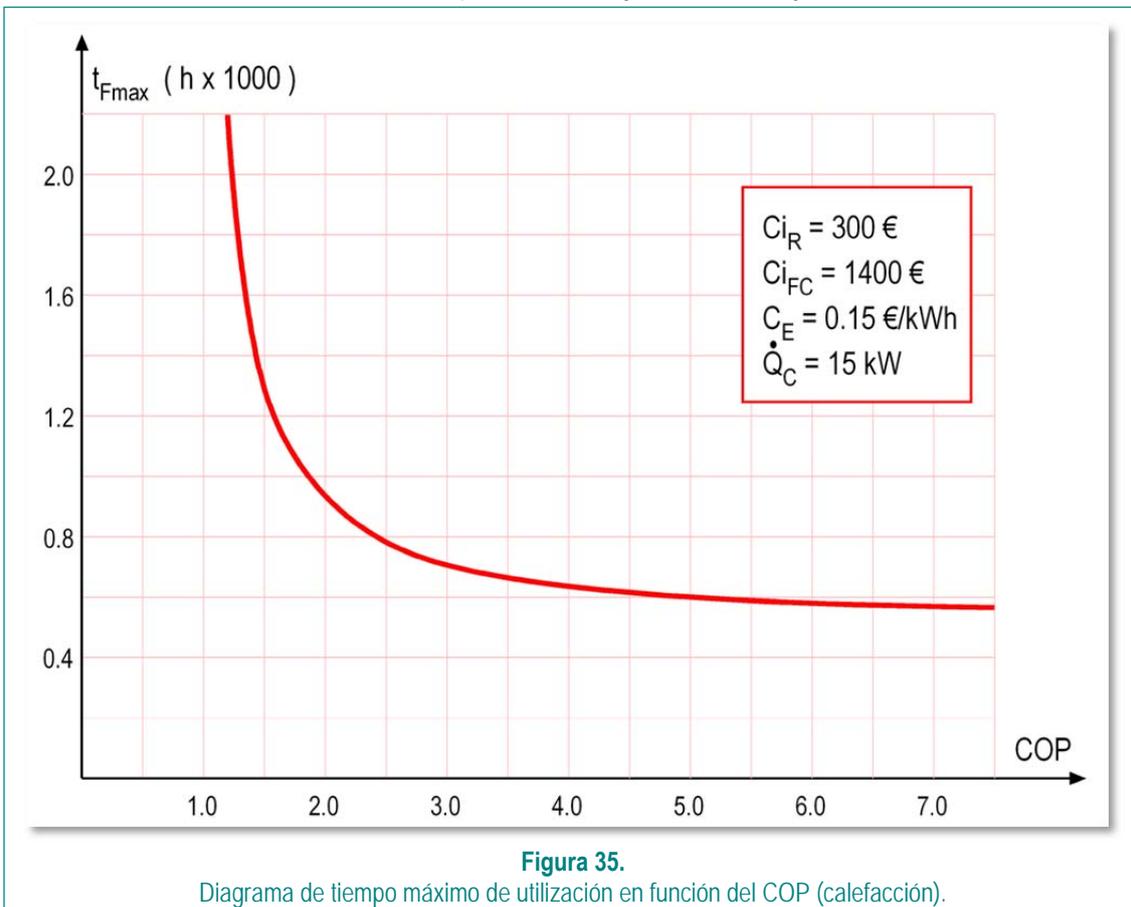
De esta representación gráfica se puede concluir que **el tiempo máximo de utilización del sistema de calefacción por resistencia eléctrica disminuirá a medida que aumente el COP del sistema termoeléctrico de calefacción por bomba de calor, pero la disminución más notable se dará en los valores de COP inmediatamente superiores a la unidad.**

A partir de que el COP tome valores mayores de 4, aproximadamente, la disminución se va haciendo menos notable y, como se desprende de la gráfica, el tiempo, para los valores con que se ha construido la gráfica, se hace prácticamente asintótico a 200 h. Así pues, en aquellas aplicaciones en las que se prevea una utilización inferior a 200 h (con los valores dados), es aconsejable la calefacción por resistencia eléctrica. En aplicaciones en las que el tiempo de utilización sea superior, lo aconsejable es un sistema de bomba de calor. Como las magnitudes empleadas hacen referencia a sistemas termoeléctricos de bomba de calor para calefacción, son válidos para éstos.

Si se emplean las magnitudes empleadas para sistemas de frío por compresión, la ecuación a representar será

$$t_{Fmax} = \left(\frac{COP}{COP - 1} \right) \frac{Ci_{FC} - Ci_R}{\dot{Q}_C C_E}$$

resultando la representación que da la figura 35, que es cualitativamente similar a la de la figura 33, pero cuantitativamente distinta, como se aprecia en la leyenda de los ejes.



De la gráfica se observa que el tiempo mínimo de utilización de un sistema de calefacción por resistencia eléctrica frente a un sistema de calefacción por bomba de calor de compresión está en torno a las 600 h (COP = 5).

Por otro lado, **el tiempo máximo de utilización de un sistema de calentamiento por resistencia eléctrica frente a un sistema de calefacción por bomba de calor de compresión (con COP = 5) está, en la actualidad, prácticamente en la zona en la que un aumento del COP no se percibiría como una disminución notable del tiempo máximo de utilización del sistema de calefacción por resistencia eléctrica.**

Todo lo anterior ofrece argumentos más que razonables para pensar que **si bien los sistemas de frío por compresión puedan seguir evolucionando en el sentido de conseguir mejores coeficientes**

de operación, el futuro parece encontrarse, a todas luces, en los sistemas termoeléctricos tanto para refrigeración como para bomba de calor.

6 CONCLUSIONES.

6.1 *Resumen de resultados.*

De todo lo expuesto hasta aquí se desprende que, por el momento, **el desarrollo tecnológico de los semiconductores impide que se puedan presentar como una alternativa en la climatización y calefacción del automóvil al frío por compresión si se pretende alcanzar los mismos niveles energéticos y de confort que se consiguen con ésta.**

Sin embargo, y aun con todo, ofrecen algunas **ventajas** que ya están siendo utilizadas por los desarrolladores de este tipo de sistemas, como son:

- Menor coste del sistema.
- Menor tiempo en alcanzar la temperatura de confort.
- Menor peso del sistema.
- Mayor flexibilidad en la regulación de la temperatura.
- Inexistencia de elementos móviles (a excepción del soplante de aire).
- Inexistencia de ruido.
- Inexistencia de vibraciones.
- Inexistencia de circuitos de fluidos refrigerantes.
- Posibilidad de generación termoeléctrica.
- Reversibilidad del sistema, utilizable tanto para refrigeración como para calefacción.

Todas ellas redundan en una **ventaja competitiva** tan sólo contrarrestada por su bajo COP, consecuencia de los **pequeños valores de las figuras de mérito conseguidos en la fabricación de los materiales empleados como semiconductores en la actualidad.** Es por todo ello que a día de hoy, su utilización se reduce a la de **sistemas de apoyo**, en tanto no consigan alcanzar la plenitud de su desarrollo.

El **desarrollo de los semiconductores** dará lugar, progresivamente, a la consecución de **figuras de mérito cada vez mayores**, así como a su abaratamiento, lo que redundará, como se ha visto, en un **aumento del tiempo máximo de funcionamiento.** Así, aun resultando Coeficientes de OPeración en sistemas termoeléctricos sensiblemente inferiores a los obtenidos en los sistemas tradicionales de refrigeración por compresión, **podrán situar a los primeros en un nivel definitivamente competitivo frente a éstos.**

Además, dado que **un ligero aumento en el Coeficiente de OPeración en los sistemas termoeléctricos de refrigeración reduce notablemente el tiempo máximo de utilización de los sistemas tradicionales de refrigeración por compresión,** cabe esperar que la implantación de este tipo de sistemas tenga lugar en un **medio o corto plazo.**

6.2 *Principales aportaciones.*

La trayectoria profesional del autor ha estado en su totalidad dedicada a la docencia. En algunos momentos, no obstante, he trabajado con empresas y la conclusión que he podido sacar de todo ello ha sido, en general, **el escaso tiempo que se dedica al estudio, la comprensión y la retención de los fundamentos de los fenómenos físicos que, en definitiva, sustentan todo desarrollo en ingeniería, aun cuando la tecnología sea novedosa y no exista formación previa en los trabajadores.**

Es por este motivo por el que he preferido dedicar, en este Trabajo de Fin de Máster, un amplio espacio al estudio de los **fundamentos de la tecnología** de los Sistemas Termoeléctricos, algo que creo bastante **novedoso** ya que en los sucesivos Planes de Estudio en cuya elaboración he podido

participar, jamás ha tenido cabida. No ya sólo eso, sino que **ni tan siquiera se ha mencionado su existencia**.

Por este motivo, las aportaciones de este Trabajo de Fin de Máster se orientan a dar una **introducción a la investigación acerca de una tecnología muy novedosa y a la que se augura un gran futuro**. En líneas generales, se podría decir que se ha buscado, de una forma didáctica, la **intersección** entre varias disciplinas, que son la Termodinámica, la Termoelectricidad y la Climatización y Calefacción en su aplicación al habitáculo de un vehículo de tamaño medio.

Es en este espacio de intersección donde se han analizado las **necesidades actuales de climatización** del habitáculo a partir de los sistemas actualmente empleados, **en lugar de analizarse a partir de un cálculo tradicional de cargas térmicas**, mucho más complejo pero con resultados similares, una vez implantada una tecnología previa, lo que no siendo una aportación relevante ni novedosa en el ámbito de la Climatización y la Calefacción, sí que parece serlo en la aplicación que nos ocupa.

Así pues, se ha revisado el **estado actual del arte**, se han **comparado sistemas** y se ha observado la **posibilidad de sustitución entre tecnologías**. Al ser desventajosa, por ahora y en términos estrictamente energéticos, la climatización y calefacción a partir de sistemas termoeléctricos, se han ofrecido alternativas comerciales que ya se están empezando a abrir camino en la climatización a partir de sistemas termoeléctricos.

Prácticamente nunca la implantación de una tecnología se realizó a partir de la sustitución absoluta de otra, sino a partir de su sustitución gradual, en tanto la primera se iba perfeccionando. Todos los indicios parecen indicar que éste es el caso.

He aquí donde se estima una nueva aportación de este Trabajo de Fin de Máster, que es la consideración ya no sólo de los sistemas termoeléctricos en términos de balance energético, sino en **términos de tiempo empleado en alcanzar la temperatura de confort**.

Aquí se dan por buenos los datos aportados por el fabricante Amerigon, pionero en la climatización y calefacción de vehículos a partir de sistemas termoeléctricos, ya que son absolutamente experimentales, desprendiéndose de sus resultados una ventaja muy notable a favor de los sistemas termoeléctricos.

Otra de las aportaciones de este Trabajo de Fin de Máster se encuentra en la **comparación, en términos económicos**, de las dos tecnologías, resultando ésta ya también muy favorable también a los sistemas termoeléctricos ya en el momento actual si se atiende exclusivamente a costes de instalación.

También se ha hecho un **análisis de los costes totales** en cada una de las dos tecnologías, comprobándose que los sistemas termoeléctricos pueden presentarse como una alternativa en la climatización y calefacción de vehículos en un corto o medio plazo.

Igualmente, se ha hecho un análisis del **tiempo máximo de utilización** de cada tecnología en función de los costes aproximados actuales que involucran.

6.3 Sugerencias para trabajos futuros.

En todos los cálculos hechos hasta aquí se ha venido asumiendo, por simplicidad de cálculo, que **tanto α como ρ son constantes e independientes de la temperatura**. En la práctica esto no se cumple nunca, haciéndose necesario el cálculo numérico computacional para obtener tanto el COP como el η , a partir de parámetros medidos en el rango de temperaturas estudiado. No obstante, **se pueden obtener estimaciones razonables del comportamiento utilizando parámetros promedio**. Esto es lo proponen algunos autores como Ioffe.

El coeficiente de Seebeck presenta una pequeña dificultad adicional. Consideremos el caso de un refrigerador termoeléctrico. En él habrá un calentamiento o enfriamiento adicionales dependiendo del signo del coeficiente de Thomson

$$\gamma = T \frac{d\alpha}{dT}$$

En la Bibliografía se ha demostrado que si se utiliza el valor medio de α en el rango de temperaturas observado en lugar de su valor en la unión fría, éste incluye el efecto de Thomson en la mayoría de los casos prácticos. Por tanto, es razonable el empleo de una figura de mérito que venga dada por

$$Z = \frac{\langle \alpha_p - \alpha_n \rangle^2}{\left[\sqrt{\langle \rho_p k_p \rangle} + \sqrt{\langle \rho_n k_n \rangle} \right]^2}$$

En esta expresión los valores entre paréntesis angulares representan **cantidades medias en el rango de temperaturas considerado**. Esta aproximación da resultados más aceptables en refrigeración que en generación termoeléctrica, ya que en la primera las diferencias de temperaturas representan generalmente una pequeña fracción de la temperatura absoluta mientras que en la segunda las diferencias de temperaturas suelen ser mucho mayores.

La profundización en los contenidos de este Trabajo se ha limitado a lo que se entiende debe tratarse en un Trabajo de Fin de Máster. Estos contenidos podrían **ampliarse** de cara a su establecimiento como **Línea de Investigación o Programa de Doctorado**, del que podría resultar tanto la publicación de artículos en revistas de alto índice de impacto como la lectura de Tesis Doctorales relacionadas con este tema.

Cabe esperar que con la evolución de la **Ciencia de Materiales** y la **Nanotecnología** se consigan figuras de mérito que puedan situar a los sistemas de climatización y calefacción termoeléctrica en igualdad de condiciones con los sistemas de frío por compresión, e incluso por encima, lo que acabará por situar esta tecnología como la de uso corriente, en sustitución de la anterior.

En tanto esto va llegando, se puede sugerir como futuro trabajo para alumnos dedicados exclusivamente a su Trabajo de Fin de Máster o a su Tesis Doctoral, la **construcción de equipos de medición y registro de las variables que intervienen en el funcionamiento de los sistemas termoeléctricos**.

Igualmente, se puede proponer la **construcción de prototipos** (de sistema de trampillas, de calefacción y/o refrigeración en panel de puerta, en suelo, en respaldo de asientos, etc) en el que se podrían ubicar los módulos termoeléctricos tanto para calor como para frío, con su correspondiente sistema de control para, a partir de ahí, **elaborar una propuesta de producto que resultase atractiva para los fabricantes de automóviles**.

Si se aborda el problema desde el lado de la mejora de las figuras de mérito, otra idea para posibles futuros Trabajos de Fin de Máster y Líneas de Investigación pasa por el establecimiento de **convenios con Institutos de Investigación en Nanotecnología**, que pudieran ayudar a conseguir semiconductores competitivos y que dieran lugar a unos COP realmente competitivos con la tecnología actual. Este problema se debería abordar, lógicamente, desde el punto de vista de la Ciencia de los Materiales y aunque su contenido fuese diferente del propuesto en este Trabajo de Fin de Máster, estaría directamente relacionado con él.

REFERENCIAS.

LIBROS

Automotive air conditioning and climate control systems.

Daly, S.

Amsterdam [etc.]: Elsevier, 2006.

CRC Handbook of THERMOELECTRICS.

Rowe, D. M..

London [etc.]: CRC Press, 1995.

Introduction to Thermal Systems Engineering: Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer.

Moran, M., Shapiro, H., Munson, B. y DeWitt, D.

New York. John Wiley & Sons, Inc., 2003.

Superconductivity / A. W. B. Taylor.

Taylor, A. W. B.

London : Wykeham, 1970.

Theory of ground vehicles.

Wong, J.

New York. John Wiley & Sons, Inc., 2001.

Theory of superconductivity / G. Rickayzen.

Rickayzen, G.

New York : Interscience, cop. 1965.

The Haynes Automotive. Heating & Air Conditioning Systems Manual.

Stubblefield, M. y Haynes J.

Somerset, England, 2000.

Thermoelectrics: Basic Principles and New Materials Developments.

Nolas, G., Sharp, J. y Goldsmid, H.

Berlin, Germany 2010.

SOFTWARE

CoolPack. Versión 1,46.

Department of Mechanical Engineering. Technical University of Denmark. 2000.

TermoGraf v5.5.

Grupo de Didáctica en Ingeniería Térmica. Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad de Zaragoza. 2011.

TECH PAPERS

Accelerating the Commercialization of Promising New Thermoelectric Materials.

Bell, L. E.

Materials Science & Technology Conference and Exhibition, Pittsburgh, Pennsylvania, October 2008.

An experimental study on absorption refrigeration system driven by engine exhaust gas for vehicles.

Hilali, I.

Ph. D. Thesis in Mechanical Engineering.

Broader Use of Thermoelectrics Systems in Vehicles.

Bell, L. E.

Proceedings of the 1st Thermoelectric IAV Conference, Berlin, Germany, October 2008.

Design to Maximize Performance of a Thermoelectric Power Generator with a Dynamic Thermal Power Source.

Crane, D., Bell, L. E.

Journal of Energy Resources Technology, Vol. 131/012401-1, March 2009.

High Capacity Thermoelectric Temperature Control Systems.

Bell, L. E.

Proceedings of the 25th International Conference on Thermoelectrics, Vienna, Austria, August 2006.

Thermoelectric HVAC for Hybrid Vehicles.

Bell, L. E.

Proceedings of the 4th Symposium Hybrid Vehicles and Energy Management, Stadthalle Brunschweig, Germany, February 2007.

WEBS

<http://www.ferrotec.com>

Tiene un sencillo programa que permite seleccionar un módulo termoeléctrico en función de cada necesidad.

<http://www.amerigon.com/>

Proveedor de sistemas de climatización de asientos para automóviles y sistemas de generación de energía eléctrica.

<http://termograf.unizar.es/>

Simulador termodinámico online.

<http://mathway.com>

Matemáticas online.

<http://www.visteon.com>

Proveedor de sistemas para automóviles.

<http://www.ree.es>

Página Web de Red Eléctrica Española.

<http://www.customthermoelectric.com>

Página Web de venta de componentes termoeléctricos en la que se pueden consultar sus curvas características.

<http://www.imst-art.com>

Programa de simulación para instalaciones frigoríficas y de climatización y calefacción.

