

OPTIMIZACION DE MAQUINAS DE CARNOT ENDORREVERSIBLES PARA CALENTAMIENTO O ENFRIAMIENTO DE CORRIENTES FLUIDAS.

Martínez, I.

E.T.S.I. Aeronáuticos (Universidad Politécnica de Madrid)
28040-Madrid

Resumen: Se hace un estudio sobre las temperaturas de trabajo de máquinas de Carnot endorreversibles (esto es, cuyos flujos de calor son proporcionales a las diferencias de temperatura con las fuentes) y se calculan las temperaturas intermedias óptimas para la calefacción o refrigeración escalonada de corrientes fluidas.

También se considera el caso de máquinas con eficiencia de conversión energética proporcional a la de Carnot, y se hace una valoración exergética de los procesos propuestos.

Finalmente, se considera una nueva aplicación de la bomba de calor, para disminuir el tamaño de los equipos de refrigeración.

Abstract: The working temperatures of endoreversible Carnot machines (i.e. those that operate with a temperature jump at the source and sink) are analysed and the intermediate optimum temperatures for heating/refrigeration of fluid streams are obtained.

Machines with an efficiency proportional to that of Carnot are also considered, and an exergetic analysis of the processes involved is made.

Finally, a novel application for heat pumps is considered, in order to decrease the size of a thermal radiator.

1. INTRODUCCION

Las máquinas térmicas son dispositivos mecánicos que transforman cíclicamente energía térmica en energía mecánica (motores) o bombean energía térmica de un nivel inferior a otro superior (llamándose frigoríficos si el objetivo es extraer calor a baja temperatura y bombas si el objetivo es suministrar calor a alta temperatura, aunque a veces el objetivo es doble: extraer de un sistema e inyectar en otro). Los motores térmicos sirven para canalizar el enorme potencial energético de los combustibles y más del 60% de la energía de uso técnico en el mundo es producida por ellos. Los frigoríficos permiten enfriar sustancias por debajo de la temperatura atmosférica y cada vez se usan más en la industria de alimentación y en el acondicionamiento ambiental (en total algo menos del 5% del consumo mundial). Las bombas de calor apenas pueden competir con otros sistemas más sencillos de calefacción y su incidencia en el consumo mundial de energía es despreciable.

Carnot fue el primero en modelizar la optimización de los motores térmicos, concluyendo que: 1) se necesitan al menos dos fuentes térmicas para que funcione un motor; 2) si hay más de dos, el rendimiento es mayor si sólo se utilizan las de temperaturas extremas; 3) la degradación de energía mecánica (rozamiento) y térmica (flujo de calor) disminuyen el rendimiento; 4) en el caso límite de no degradación de energía mecánica ni térmica, todos los motores que funcionasen entre las mismas dos temperaturas tendrían igual rendimiento, cuyo valor es

$$\eta = 1 - T_2/T_1 \quad (1)$$

que se obtiene del balance energético (Fig. 1a) $W = Q_1 - Q_2$, de la generación de entropía del universo $S = Q_1/T_1 - Q_2/T_2 = 0$ y de la definición $\eta = W/Q_1$.

Estos motores de Carnot no tienen ninguna utilidad práctica, pues aunque su eficiencia en

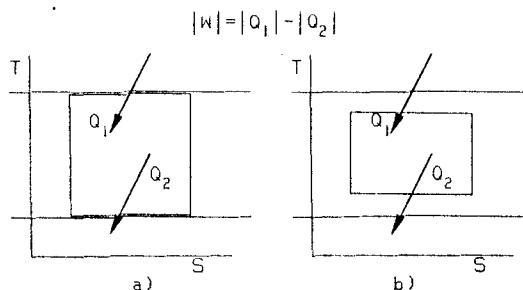


Fig. 1. Diagramas de a) máquina de Carnot, b) máquina endorreversible.

transformar energía térmica Q_1 en energía mecánica W sea máxima, la transmisión de calor, que puede ponerse como

$$Q = UA\Delta T \quad (2)$$

ralentizaría infinitamente su funcionamiento; es decir, un flujo de calor Q (que además se quiere que sea grande para que W también lo sea) con un área A y un coeficiente global de transmisión de calor U finitos, requiere un salto finito de temperaturas. Ello obliga a considerar motores como los de Carnot, pero permitiendo ahora una degradación de energía térmica entre las fuentes y la propia máquina (motor endorreversible), es decir, considerando que el motor funciona entre T_1 y T_2 recibiendo calor de una fuente a $T_{10} > T_1$ y cediendo calor a una fuente a $T_{20} < T_2$. Aunque ahora el rendimiento $\eta = 1 - T_2/T_1$ será menor que el de Carnot entre T_{10} y T_{20} , $\eta_c = 1 - T_{20}/T_{10}$, la potencia producida W será ya finita.

La optimización de este motor (Fig. 1b), suponiendo que U no depende de la temperatura, fue hecha en 1973 por Curzon y Ahlborn /1/ y ya ha pasado a los libros de texto /2-3/, obteniéndose la potencia máxima

$$W = U_1 A_1 T_{10} \frac{\left(\frac{1 - \sqrt{\frac{T_{20}}{T_{10}}}}{\sqrt{\frac{U_1 A_1}{U_2 A_2}} + 1} \right)^2}{\frac{t_{\text{ciclo}}}{t_{\text{isot}}}} \quad (3)$$

cuando $T_1 = \alpha T_{10}$ y $T_2 = \alpha \sqrt{T_{10} T_{20}}$, con

$$\alpha = \frac{1 + \sqrt{\frac{U_2 A_2 T_{20}}{U_1 A_1 T_{10}}}}{1 + \sqrt{\frac{U_2 A_2}{U_1 A_1}}} \quad (4)$$

resultando curiosamente que el rendimiento sólo depende de las temperaturas de las fuentes (como el de Carnot) obteniéndose

$$\eta = 1 - \sqrt{T_{20}/T_{10}} \quad (5)$$

y una eficiencia exergética

$$\eta_x = \frac{1}{1 + \sqrt{T_{20}/T_{10}}} \quad (6)$$

que se reduce al 50% de la de Carnot cuando las temperaturas de trabajo son próximas.

El caso de frigoríficos y bombas es distinto. Podría parecer que el criterio de bondad fuese similar: minimizar la potencia consumida para bombear energía térmica desde T_{20} a T_{10} ($T_{10} > T_{20}$), pero la respuesta no es satisfactoria porque sólo admite la solución trivial: $W=0$ para $T_2=T_{20}$, es decir, que no se necesita aportar trabajo para mantener una $T_{20} < T_{10}$ si no hay que extraer calor. Pero desgraciadamente en un frigorífico siempre hay que extraer calor, al menos para compensar la entrada de energía térmica desde el ambiente T_{10} (más la disipación de energía mecánica o eléctrica a T_{20}). Por tanto, en frigoríficos y bombas viene fijado el Q_2 o el Q_1 deseado, y con los datos de transmisión térmica queda unívocamente determinada la solución endorreversible, sin dejar grados de libertad que permitan la optimización, como puede apreciarse en la Fig. 2.

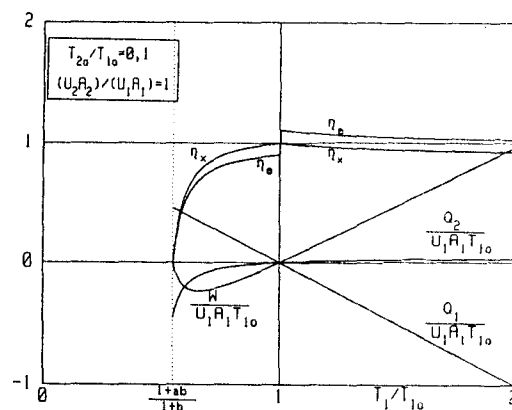


Fig. 2. Ejemplo de actuaciones de una máquina endorreversible ($T_1/T_{10} < 1$ motor, > 1 frigorífico o bomba). Se muestra el rendimiento exergético η_x , la eficiencia energética η_e (del motor y del frigorífico), y las potencias térmicas y mecánicas asociadas. Obsérvese que para un cierto valor de T_1/T_{10} la potencia producida por el motor presenta un máximo.

Pero el calentamiento o enfriamiento de corrientes fluidas en presencia de una atmósfera isoterma presenta muchas más posibilidades, ya que al ir variando la temperatura de la corriente (fuente térmica), o bien se hace trabajar la máquina de bombeo térmico entre las temperaturas extremas (con lo cual el rendimiento no será muy bueno), o bien se necesitarán varias máquinas para que calienten/enfríen el fluido escalonadamente (el rendimiento será mayor, aunque también el coste en equipos).

2. CALENTAMIENTO/ENFRÍAMIENTO DE UNA CORRIENTE FLUIDA

El planteamiento del problema que aquí se pretende resolver es el siguiente: sea una corriente fluida en flujo estacionario, de gasto

másico m , que se desea calentar/enfriar desde la temperatura ambiente T_a a una temperatura T_o ($T_o > T_a$ para calentamiento y $T_o < T_a$ para enfriamiento) en presencia de una atmósfera isoterma. La función entalpía h , que interviene en el balance energético de un volumen de control $\Delta h = q + w$ (aquí será $w=0$ para la corriente), se supondrá que varía linealmente con la temperatura, para obtener resultados analíticos sencillos, aunque también se considerará lineal a trozos para estudiar el efecto de un posible cambio de fase. La pérdida de presión en el conducto se supone irrelevante.

Este problema es semejante al caso no estacionario de pasar una masa desde T_a hasta T_o .

La optimización energética en el calentamiento/enfriamiento de corrientes fluidas tiene una importancia de primer orden, ya que una cuarta parte de la degradación de energía en toda la industria (que representa la mitad del consumo mundial de energía) se localiza en el calentamiento de agua a vapor (y sin embargo, a los ojos del neófito, las calderas son uno de los elementos con mayor rendimiento, mayor del 80% en general).

Normalmente, para calentar desde T_a hasta T_o se utiliza un quemador (o una resistencia eléctrica en las instalaciones pequeñas) donde se consume una energía superior a $m(h_o - h_a)$, que es la que toma el fluido, debido por ejemplo a que la eficiencia de los quemadores suele ser del 80% al 90%. La Termodinámica enseña que el consumo energético mínimo se lograría no aumentando la entropía s del universo, y sería igual a la variación de exergía de la corriente

$$W_{\min} = m [(h_o - h_a) - T_a (s_o - s_a)] \quad (7)$$

Una de las posibles configuraciones (teóricas) de conseguir este resultado sería la de instalar infinitas máquinas de Carnot, trabajando cada una entre la temperatura ambiente y una T_i diferente, escalonada entre T_a y T_o . Si ya de por sí una máquina de Carnot es inoperativa, infinitas resulta una desorbitada utopía, pero antes de pasar al caso más práctico de máquinas endorreversibles, analicemos la influencia del número de máquinas a utilizar.

2.1. Optimización estática

Si el calentamiento/enfriamiento se realizase con una única máquina de Carnot, ésta debería funcionar entre T_a y T_o , con lo que consumiría un trabajo

$$W = (1 - T_a/T_o) m (h_o - h_a) \quad (8)$$

Por ejemplo, para el calentamiento de una corriente de agua a una atmósfera de presión, desde el punto de hielo (0°C) hasta el punto de vapor (100°C), suponiendo una capacidad térmica específica $c = 4200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, se requiere aportar una energía de al menos $w_{\min} = c(T_o - T_a) - T_a c \ln(T_o/T_a) = 4200(373 - 273) - 273 \cdot 4200 \ln(373/273) = 62 \text{ kJ/kg}$, mientras que con un quemador ideal o una resistencia eléctrica se aportan $w = c(T_o - T_a) = 420$

kJ/kg , y con una máquina de Carnot, según (8), se reduce ya a $w = 113 \text{ kJ/kg}$.

La optimización estática cuando se dispone de un número finito n de bombas de Carnot también conduce a un resultado analítico sencillo si no hay cambios de fase. Es fácil comprender que las bombas deberán de trabajar entre T_a y T_i de manera a minimizar el consumo energético total

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{T_i - T_a}{T_i} mc (T_i - T_{i-1}) \quad \text{con } T(0) = T_a \text{ y } T(n) = T_o \quad (9)$$

lo cual se consigue con

$$\frac{1}{mc} \frac{\partial W}{\partial T_i} = - \frac{T_a T_i}{T_i^2} + \frac{T_a}{T_{i+1}} = 0 \quad \text{para todo } i \quad (10)$$

que implica

$$T_i = (T_o^i \cdot T_a^{n-i})^{1/n} \quad (11)$$

es decir, las temperaturas de trabajo deben estar en proporción geométrica para que el trabajo total sea mínimo, el cual vendrá dado por

$$W = mc [T_o - T_a - T_a (1 - (T_a/T_o)^{1/n})] \quad (12)$$

Por supuesto que el criterio de rentabilidad económica de una configuración deberá incluir no sólo el gasto de funcionamiento (proporcional a W) sino también el coste de adquisición de equipos (que aumenta con n), por lo que previsiblemente se presentará un valor óptimo como se esquematiza en la Fig. 3.

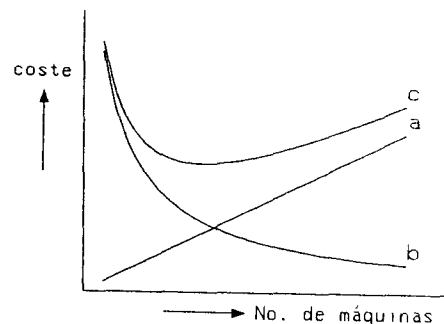


Fig. 3. Variación del coste de calentamiento/enfriamiento en función del número de máquinas: a) coste del equipo, b) coste de la energía, c) coste total.

Obsérvese que también se hubiera llegado al interesante resultado (12) si se hubiera considerado un caso más realista en que la eficiencia de bombeo térmico fuese una fracción constante de la de Carnot, igual para todas las máquinas. Asimismo, conviene apuntar que aunque la eficiencia conjunta de dos bombas de Carnot funcionando en cascada entre T_a y T_o a través de una T_i intermedia cualesquiera es igual al de una sola máquina desde T_a hasta T_o , si ambas máquinas tienen una eficiencia menor que la de Carnot (una fracción f_a y f_o , respectivamente), su eficiencia conjunta es menor que cualquiera de ellas por separado, y además presenta un mínimo cuando la temperatura intermedia es

$$T_i = \sqrt{T_a T_o \frac{f_o (1 - a_a)}{f_a (1 - a_o)}} \quad (13)$$

2.2. Optimización dinámica

Tomando ya en consideración que en la práctica es necesario una degradación de energía térmica para conseguir los flujos de calor implicados, se va a estudiar el calentamiento/enfriamiento de una corriente de un fluido perfecto con máquinas endorreversibles.

Si sólo se dispone de una máquina, las temperaturas de trabajo vienen fijadas. Para el calentamiento desde T_a hasta T_o , por ejemplo, la máquina deberá operar entre $T_1 > T_o$ dada por

$$T_1 = T_o + \frac{mc}{U_1 A_1} (T_o - T_a) \quad (14)$$

y una $T_2 < T_a$ (definida por la eficiencia)

$$T_2 = \frac{T_a}{1 + \frac{(U_1 A_1)/(U_2 A_2)}{(U_1 A_1)/(mc)} + 1} \quad (15)$$

siendo el consumo energético

$$W = mc(T_o - T_a) - U_2 A_2 (T_a - T_2) \quad (16)$$

con T_2 dado por (15). En el caso más general en que se puedan utilizar n máquinas, se pueden optimizar las temperaturas intermedias de funcionamiento, que, en el supuesto de que la transmitancia térmica UA de todas las máquinas sea la misma, conduce al mismo resultado de la optimización estática, es decir, que se consigue la eficiencia conjunta máxima cuando todas las máquinas trabajan por igual (W es el mismo para cada una de ellas), y las temperaturas de trabajo son

$$T_i = (T_o^i \cdot T_a^{n-i})^{1/n} \quad (17)$$

y por tanto, independientes tanto de la transmitancia térmica UA de las fuentes y sumideros, como de las propiedades del fluido, mc .

3. CALENTAMIENTO DE UNA CORRIENTE ACOPLADO AL ENFRIAMIENTO DE OTRA.

Otro problema de gran interés es el estudio de la optimización del consumo energético en procesos concurrentes, como puede ser el calentamiento de agua sanitaria acoplado al enfriamiento del aire ambiental en el acondicionamiento de verano, por ejemplo.

Suponiendo que ninguna corriente cambia de fase, y que la corriente de capacidad térmica $m_1 c_1$ se ha de calentar desde la temperatura atmosférica T_a hasta T_{10} y la corriente $m_2 c_2$ se ha de refrigerar desde la T_a hasta la T_{20} , por el método usual de conseguirlo, pasando m_1 por una caldera y m_2 por un frigorífico, puede mejorarse grandemente, como se detalla a continuación.

En primer lugar, el refrigerador mencionado anteriormente podría utilizarse para bombear energía térmica desde T_{20} hasta T_{10} y no sólo hasta la atmósfera. Pero se mejora aún más el rendimiento si se pueden utilizar dos máquinas, pues, además de la configuración obvia de utilizar una para el calentamiento y otra para la

refrigeración, se podrían acoplar escalonadamente de tal manera que una calentase y enfriase parcialmente la corriente respectiva, y la otra completase la tarea. Debido a las múltiples combinaciones posibles (en la Fig. 4 se muestra un ejemplo), la optimización requiere el uso de un ordenador.

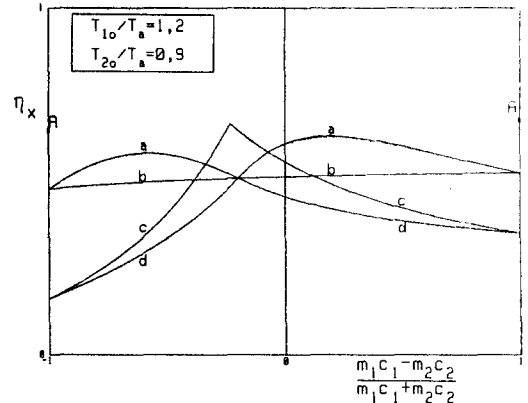


Fig. 4. Optimización del rendimiento exergetico en un proceso de calentamiento de una corriente $m_1 c_1$ desde T_a hasta T_{10} acoplado al enfriamiento de una corriente $m_2 c_2$ desde T_a hasta T_{20} , mediante dos máquinas de Carnot. A, puntos singulares correspondientes a una sola corriente con las dos máquinas escalonadas según (12). a) una máquina realizando por completo una tarea (calefacción/refrigeración) y parte de la otra. b) cada máquina realizando una tarea. c) ambas máquinas realizando parcialmente ambas tareas. d) una sola máquina realizando ambas tareas.

4. ENFRIAMIENTO DE UNA CORRIENTE POR RADIACION ASISTIDA CON BOMBA DE CALOR. FIN DEL RESUMEN

Una reciente aplicación de la bomba de calor es para reducir el tamaño de los sistemas de evacuación de calor en que la radiación térmica es el modo dominante, ya que para una misma potencia a radiar, Q_r , de la expresión $Q_r = U_r A_r (T_r - T_a)$, se deduce que, al aumentar con una bomba la temperatura del radiador T_r , se puede reducir drásticamente el área de radiador A_r necesaria para conseguir la misma evacuación de calor ya que U_r es una constante que sólo depende de las propiedades ópticas superficiales y de la geometría.

Como la adición de una bomba de calor trae consigo un notable incremento en el precio de instalación y además requiere potencia auxiliar, esta aplicación sólo ha sido pensada de momento para vehículos espaciales, donde el ahorro de masa alcanzable compensaría con creces el coste adicional.

En cualquier caso, hay que estudiar con detalle el incremento de masa debido a la propia bomba y el asociado a la producción de potencia auxiliar, ya que, como se puede apreciar en el esquema de la Fig. 5, el rango de temperaturas de bombeo en que existe ahorro de masa (si es que ha lugar) depende de ello.

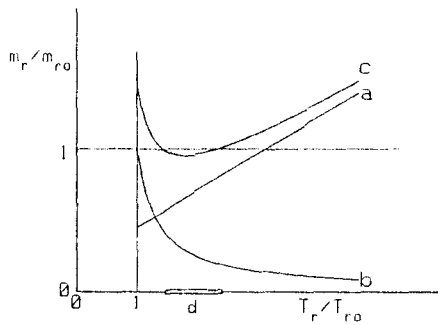


Fig. 5. Esquema que muestra el posible ahorro de masa en una instalación de evacuación de calor por radiación asistido por bombeo térmico desde T_{r0} hasta T_r . En ordenadas el cociente masa con bomba dividido por masa inicial. a) disminución de masa asociada al tamaño del radiador. b) aumento de masa debido a la bomba y equipo auxiliar. c) masa total relativa de la instalación con bomba. d) rango en que se ahorra masa.

5. CONCLUSIONES

Aunque el desarrollo de este trabajo ha sido eminentemente teórico, sí se pueden extraer las siguientes conclusiones prácticas:

-La eficiencia energética de las máquinas reales es baja (del orden del 30%) si se compara con la de Carnot, y ello es debido principalmente a la baja transmitancia térmica de las fuentes y no al tipo de ciclo termodinámico, fricciones, etc., que son efectos de segundo orden.

-Un hecho que avala lo anterior es el comprobar que los motores reales de mejor rendimiento operan entre las temperaturas que proporcionan la máxima potencia para una transmitancia térmica dada (Fig. 2).

-Debido a que normalmente el salto de temperatura entre las fuentes de un motor (unos 600 K) es mucho mayor que para bombas y refrigeradores usuales (unos 100 K), el rendimiento exergético de los motores suele ser mayor que el de frigoríficos y bombas.

-Si la diferencia de temperatura de las fuentes de un motor es pequeña y se hace funcionar de forma endorreversible en el punto de máxima potencia, el rendimiento exergético ya viene limitado a la mitad del de Carnot.

-Al igual que en la compresión o expansión escalonada de un fluido con refrigeración/calentamiento intermedios se mejoraba el rendimiento exergético, en el calentamiento o enfriamiento de una corriente se consigue un cierto ahorro si se utilizan varias máquinas para realizar el proceso escalonadamente. Para un fluido perfecto, las temperaturas intermedias óptimas están en progresión geométrica.

-Las temperaturas intermedias óptimas para la calefacción/enfriamiento con máquinas endorreversibles son las mismas que para máquinas de Carnot.

-El acoplamiento de procesos de calentamiento con procesos de enfriamiento para una optimización global puede ser muy beneficioso, sobre todo si las cargas van a ser similares (no suele compensar acoplar procesos de tamaño muy diferente).

-Muchas de las aplicaciones de las bombas de calor están descartadas actualmente por el gran coste de los equipos en comparación al precio de la energía, pero en las aplicaciones aeroespaciales, donde hay otros grandes costes asociados, la bomba de calor va encontrando cada vez más usos, como el que aquí se ha presentado.

REFERENCIAS

1. Curzon, F.L. & Ahlborn, B. "Efficiency of a Carnot engine at maximum power output". Amer. J. Phys. 43, 22-24, 1975.
2. Callen, H.B. "Thermodynamics and an introduction to thermostatistics". John Wiley & Sons, 1985.
3. Feidt, M. "Thermodynamique et optimisation énergétique". Technique et documentation Lavoisier, 1987.

END OF ABSTRACT