Máquinas térmicas acopladas y sistemas brownianos

B. Jiménez de Cisneros* y A. Calvo Hernández
Departamento de Física Aplicada
Universidad de Salamanca
37008 Salamanca

La Termodinámica Clásica de Equilibrio (TCE) nos dice que cuando un motor funciona intercambiando calor con dos baños térmicos de temperaturas T_1 y T_2 ($T_1 < T_2$), su eficiencia termodinámica está limitada por la eficiencia de Carnot, $\eta_C = 1 - \tau$ ($\tau = T_1/T_2$). Esta cota tiene escasa relevancia práctica ya que se refiere a procesos reversibles en los que la conversión de energía ocurre de forma infinitamente lenta, de manera que las máquinas reales muestran unas eficiencias que suelen ser mucho menores. Las dificultades de la TCE a la hora de estudiar el comportamiento de los convertidores energéticos reales ha estimulado el desarrollo del campo conocido como Termodinámica de Tiempo Finito (TTF), que pretende describir de manera sencilla las principales fuentes de irreversibilidad observadas en dispositivos reales.

Un ejemplo clásico de los métodos de la TTF es el modelo de Curzon-Ahlborn. Consiste en un ciclo de Carnot recorrido en tiempo finito en el que la única fuente de irreversibilidad es debida a los intercambios de calor entre el sistema de trabajo y los baños térmicos (hipótesis endoreversible). Si los intercambios de calor además obedecen una ley de Fourier, se encuentra que la eficiencia del motor en condiciones de máxima potencia es $\eta_{CA} = 1 - \sqrt{\tau}$, conocida como eficiencia de Curzon-Ahlborn. Esta expresión constituye una buena aproximación de la eficiencias observadas en diferentes dispositivos térmicos reales, lo que sugiere que debería ser posible derivarla en un contexto más amplio. En esta línea, Van den Broeck[1] ha propuesto un modelo formado por un conjunto de máquinas térmicas genéricas que operan en el régimen de respuesta lineal caracterizado por ciertos coeficientes de transporte L_{ij}. El acoplamiento en cadena de estas máquinas equivale a un único convertidor energético que funciona entre temperaturas arbitrarias T_1 y T_2 y que puede ser analizado con cierto detalle dentro del esquema de la Termodinámica Irreversible Lineal (TIL). Si las máquinas operan individualmente a máxima potencia y el acoplamiento entre los flujos termodinámicos es perfecto, la eficiencia del dispositivo térmico total coincide con la de Curzon-Ahlborn.

Recientemente se ha extendido esta derivación de la eficiencia de Curzon-Ahlborn al estudio de diferentes dispositivos térmicos[2] dentro el esquema de la TIL y se ha demostrado que es un caso particular de otra más general[3]: debido al acoplamiento entre las máquinas, las fuerzas termodinámicas a lo largo de la cadena y los coeficientes de transporte deben satisfacer una ecuación diferencial cuya solución depende de una constante de integración que determina el régimen de funcionamiento de toda la cadena. Sorprendentemente, este régimen de funcionamiento "global" no coincide necesariamente con el régimen de funcionamiento de cada máquina. Por ejemplo, cuando la cadena trabaja a máxima potencia las máquinas individuales no operan generalmente en ese mismo régimen. Sin embargo, la eficiencia de Curzon-Ahlborn y otros resultados de la TTF endoreversible pueden ser recuperados sin postular un régimen concreto de operación para todas las máquinas; basta con que los flujos termodinámicos estén perfectamente acoplados. En caso contrario aparecen irreversibilidades adicionales que se pueden formular[4] mediante un flujo de calor entre los baños externos, reproduciendo así algunas características de los modelos irreversibles de la TTF. Como sistema físico concreto donde se pueden poner a prueba estas ideas se considerará el formado por un conjunto de partículas brownianas que se mueven en un fluido con una distribución de temperatura inhomogénea.

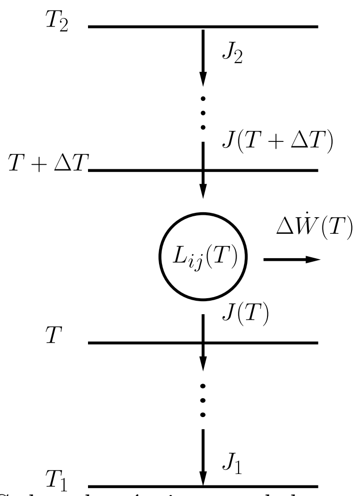

Figura 1. Cadena de máquinas acopladas entre los baños de temperaturas T_1 y T_2: $J(T)$ es el flujo de calor que atraviesa cada baño y $\Delta\dot{W}$ la potencia extraída de cada máquina.

* cisneros@usal.es

[1] C. Van den Broeck, Phys. Rev. Lett. **95** 190602 (2005).
[2] B. Jiménez de Cisneros, L. A. Arias-Hernández y A. Calvo Hernández, Phys. Rev. E **73** 057103 (2006).
[3] B. Jiménez de Cisneros, A. Calvo Hernández, Phys. Rev. Lett. **98** 130602 (2007).
[4] B. Jiménez de Cisneros, A. Calvo Hernández (enviado a publicar).