

UNA DEMOSTRACION PARA CURSOS DE TERMODINAMICA: EL TUBO DE RANQUE-HILSCH

A.L. Salas Brito y Carlos A. Vargas

Departamento de Física, Facultad de Ciencias, UNAM
Apartado Postal 70-542, 04510 México D.F.

(recibido enero 23, 1985; aceptado octubre 16, 1985)

RESUMEN

En este trabajo discutimos la construcción, funcionamiento y posibles aplicaciones docentes del tubo de Ranque-Hilsch. Este dispositivo es capaz de separar una corriente de aire a temperatura ambiente en dos, una a alta y otra a baja temperatura. Este hecho puede usarse para motivar discusiones en clase sobre la segunda ley de la termodinámica.

ABSTRACT

In this work we discuss the design, operation and didactic uses of a Ranque-Hilsch tube. This device is capable to produce two simultaneous streams of hot and cold air from a stream at room temperature,

this fact can be used for motivating class discussions about the second law of thermodynamics.

1. INTRODUCCION

Los experimentos demostrativos deberían ser una parte integral del proceso de enseñanza en todo curso de física a nivel de licenciatura. Lamentablemente no se les ha incorporado en forma sistemática dentro de los cursos que se imparten en las escuelas del país. Estos experimentos muestran hechos y fenómenos importantes y permiten exhibir el aspecto experimental de la física dentro del salón de clases; sirven para ilustrar y aclarar los conceptos que se discuten y, si se plantean adecuadamente, generan y mantienen el interés de los estudiantes, promueven la discusión de los fenómenos observados y les permiten establecer conexiones entre teoría y experimento a diferentes niveles⁽¹⁾. La experiencia puede resultar aún más provechosa si el experimento que se presenta conduce a resultados inesperados que sorprendan la intuición del estudiante, pues esto lo obliga a revisar su comprensión de los conceptos y la forma en que se aplican a los hechos. La aparición de contradicciones y su posterior aclaración afina la intuición y ayuda a entender mejor los conceptos.

El propósito de este trabajo es sugerir un experimento demostrativo del último tipo y describir la construcción y funcionamiento del dispositivo que se emplea en éste. Esta demostración se puede usar para motivar discusiones en clase, en cursos de termodinámica a nivel de licenciatura⁽²⁾. El dispositivo - *tubo de Ranque-Hilsch* - es de construcción muy simple; prácticamente sólo consiste de un par de tubos unidos por una cámara hueca de forma especial (Fig. 1) y que no contiene partes móviles. Empleando éste es posible obtener simultáneamente corrientes de aire a alta (hasta de $+40^{\circ}$ C) y a baja (hasta de -30° C) temperatura a partir de una corriente, a temperatura ambiente (20° C) y a unas cuantas atmósferas de presión que se inyecte dentro de la cámara, tal como lo ha reportado Hilsch⁽³⁾.

La demostración que proponemos es muy sencilla, consiste en mostrar a la audiencia el tubo funcionando; si esto se hace durante la discusión de la segunda ley de la termodinámica, puede generar respuestas que van desde la sorpresa hasta la incredulidad pues la producción "espontánea"

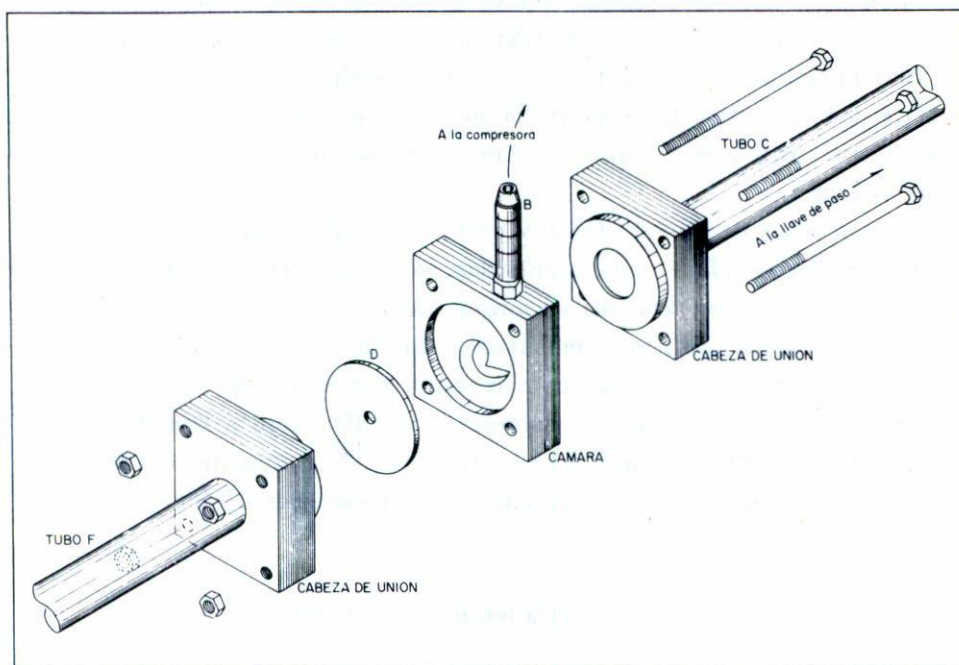


Fig. 1. Tubo de Ranque-Hilsch. Se muestran las piezas separadas.

de diferencias de temperatura en la corriente de aire (originalmente con temperatura uniforme) parece contradecir una de las consecuencias de la segunda ley. Claro está que para inyectar el gas es necesario realizar cierta cantidad de trabajo, pero lo sorprendente del funcionamiento del tubo no es la mera aparición de una diferencia de temperaturas, sino la brusca disminución ΔT que se puede obtener en él (en nuestro caso obtuvimos $\Delta T = 15^\circ \text{C}$ usando aire a 20°C y a 2.5 atm de presión, o $\Delta T \sim 25^\circ \text{C}$ usando nitrógeno a 18°C y 5 atm de presión) y no resulta obvio que el trabajo de compresión pueda explicar la disminución de la temperatura de una fracción del gas a costa del aumento de la temperatura de la fracción restante.

El dispositivo no es nuevo. La aparición espontánea de un gradiente de temperaturas dentro de un vórtice de gas que circula por un tubo, fue descubierta al parecer por G. Ranque⁽⁴⁾ en 1933 y estudiado detalladamente por R. Hilsch⁽³⁾, quien construyó varios modelos del tubo. Es posible que el efecto lo hubiese descubierto independientemente Dirac en 1933 durante sus investigaciones experimentales sobre separación isotópica⁽⁵⁾. Este es un hecho curioso, pues la descripción que se da en la Ref. 5 del aparato usado por Dirac indica que se diseñó sobre los mismos principios que el tubo de Ranque-Hilsch.

A pesar de que el efecto y el tubo son ampliamente conocidos en círculos de ingeniería y ciencia aplicada, donde son temas de investigación actual⁽⁶⁻⁸⁾, no se les menciona en ninguno de los libros de termodinámica o mecánica de fluidos que hemos consultado. Las únicas referencias al tubo que conocemos, fuera del contexto de revistas especializadas, son: un artículo en *Scientific American*⁽⁹⁾, una mención en "The Lloyd's Manual"⁽¹⁰⁾ y otra en el libro "The Flying Circus of Physics"⁽¹¹⁾. A pesar de estas referencias, el dispositivo y sus potenciales aplicaciones didácticas no parecen ser muy conocidas.

2. DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL TUBO

El dispositivo se muestra esquemáticamente en la Fig. 1. Consiste de un par de tubos C y F con el mismo diámetro interno pero longitudes desiguales; el primer tubo debe tener una longitud de entre 35 y 45 veces su diámetro interno⁽³⁾ (en nuestro caso el diámetro fue de 5/8 de pulgada); el segundo tubo debe tener una longitud aproximada de un tercio de la del primero⁽³⁾. Los tubos están unidos por una cámara de sección espiral (Fig. 2) que tiene un orificio por el que se inyecta aire a través de la boquilla B. Por el tubo C se obtiene el aire caliente y por el F el aire frío. Al penetrar el aire en la espiral de la cámara, se ve obligado a fluir en un vórtice que se desplaza por el tubo C, ya que la presencia del diafragma D (cuyo orificio tiene un diámetro de 3/16 de pulgada) impide su libre circulación hacia F. Bajo estas condiciones casi nada del aire saldría por el tubo F, por lo que se acopla una llave de paso en el extremo de C;

esta llave sirve para regular la fracción μ del aire que pasa por el diafragma y escapa por el tubo F, la fracción $1 - \mu$ restante escapa por el tubo C. La llave de paso empleada fue del tipo de las usadas en instalaciones de gas. El dispositivo se construyó de latón, pero se puede construir de cualquier otro material sin ningún problema.

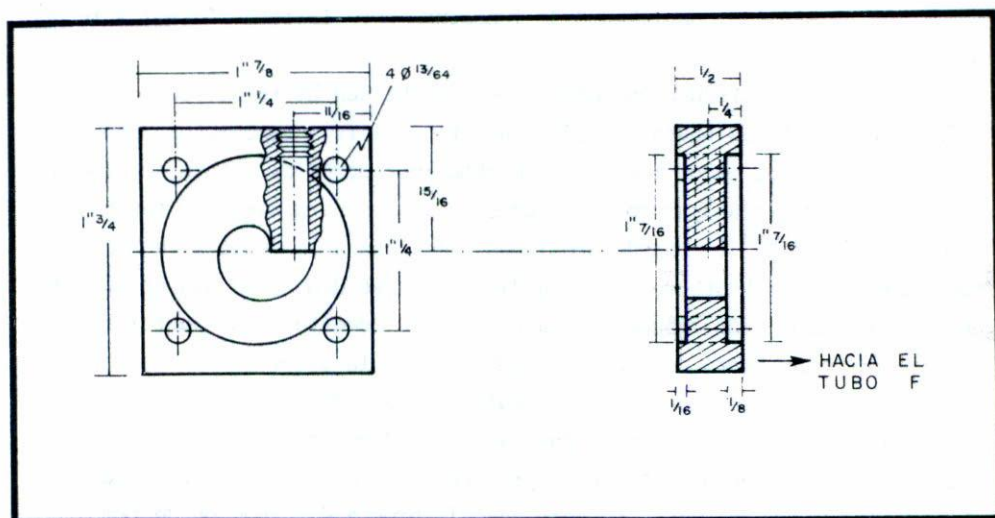


Fig. 2. Detalles de la cámara espiral.. Se dan las dimensiones usadas en su construcción. El diámetro interno de la boquilla es $\frac{1}{8}$ pulg.

Para estudiar el funcionamiento del tubo, inyectamos aire a las presiones disponibles en nuestros laboratorios docentes (presión máxima 2.5 atm). Las medidas de presión se hicieron con un manómetro tipo Bourdon dispuesto antes de la boquilla B. Como no disponíamos de termómetros apropiados para medir la temperatura del gas en los tubos y puesto que éste varía con la distancia al eje de los tubos⁽⁷⁾, no medimos directamente la temperatura del gas, sino la temperatura de los tubos C y F. Para esto empleamos termopares de cromel-alumel en contacto con las paredes internas de los tubos, esperando alrededor de dos minutos antes de tomar la medida (una vez fijadas las condiciones de operación) para que la temperatura de cada tubo fuese aproximadamente la de la corriente de aire.

Inyectando aire a 20°C a la presión máxima disponible (2.5 atm) y ajustando la válvula de paso para obtener la temperatura más baja posible en el tubo F, obtuvimos aire frío a 5°C y aire caliente a 34°C. La posición de la válvula que produce el mínimo valor para la temperatura en la corriente fría es fácil de determinar. El tubo al funcionar produce un sonido intenso y cuando éste se vuelve similar al silbido agudo que produce una cafetera con agua hirviendo, se tiene la posición apropiada⁽³⁾. Estimamos que para estas condiciones de funcionamiento la fracción del aire que sale por F es de 0.4.

En la introducción mencionamos que Hilsch ha reportado la obtención de temperaturas hasta de -30°C inyectando aire a temperatura ambiente en el dispositivo; valor menor al que obtuvimos nosotros. Esto se debe a que es necesario trabajar con presiones de 10 atm para alcanzar tan bajas temperaturas^(3, 6-8). Usando presiones similares a la nuestra se han reportado temperaturas hasta de -5°C; la diferencia se debe a un diseño más elaborado del tubo. Sin embargo, para propósitos docentes, los puntos finos de diseño quedan fuera de consideración, ya que la diferencia de temperaturas que se obtiene es lo suficientemente grande y puede apreciarse inclusive al tacto por los estudiantes en una sesión demostrativa. De hecho hemos probado nuestro tubo a 5 atm, esta presión basta para obtener temperaturas mínimas del orden de -7°C. En este caso la brusca disminución de temperaturas se puede apreciar "visualmente" como una gruesa capa de escarcha que se forma de inmediato sobre el tubo F⁽¹²⁾.

La clave del funcionamiento del dispositivo está en la cámara espiral donde se forma un vórtice de gas que fluye constreñido dentro de sus paredes. El efecto de enfriamiento se debe a una transferencia interna de energía dentro del gas, que va del núcleo hacia la periferia del vórtice; este flujo produce la separación del vórtice en una región central fría y en otra de temperatura mayor, que circunda a la anterior. No se ha encontrado una explicación completamente satisfactoria para el mecanismo responsable de la transferencia de energía. La explicación "clásica", cuya idea básica se remonta al trabajo de Hilsch⁽³⁾, atribuye la transferencia a la fricción interna en el gas y a la compresión de las capas periféricas del

vórtice debido al movimiento de su núcleo. Mientras por una parte la velocidad tangencial en el vórtice tiende a incrementarse hiperbólicamente de acuerdo a la conservación del momento angular, por otra la fricción interna tiende a mantener una velocidad angular constante dentro del vórtice. El resultado de estos procesos en competencia es la transferencia de energía cinética desde el núcleo hacia las regiones periféricas del vórtice, lo que provoca la separación de éste en un núcleo frío que casi no gira y una región periférica de alta velocidad y alta temperatura^(6,7).

Recientemente Kurosaka⁽⁸⁾ ha propuesto una explicación diferente del mecanismo responsable del flujo de energía dentro del gas. Como ya lo mencionamos, al hacer funcionar el dispositivo aparece un sonido de gran intensidad cuyo tono varía con la fracción μ del aire. Según Kurosaka, es este sonido (a través del "arrastré acústico") el responsable de la separación de temperaturas. Las ondas sonoras que se propagan en el gas deforman el flujo, convirtiendo un vórtice esencialmente libre en un vórtice forzado y dando lugar al gradiente de temperaturas en la dirección radial. Las ideas de Kurosaka han sido confirmadas por varios experimentos realizados por él mismo, pero parece que aún no se ha dicho la última palabra sobre este peculiar fenómeno.

3. DEL FUNCIONAMIENTO DEL TUBO Y LA SEGUNDA LEY

Una de las motivaciones⁽¹³⁾ de este trabajo es el uso que se puede dar al tubo de Ranque-Hilsch como experimento demostrativo en cursos de termodinámica. Para que la demostración cumpla su objetivo es necesario concluir la mostrando a la audiencia que el tubo funciona en perfecto acuerdo con las leyes de la termodinámica. La impresión de que el tubo no puede producir diferencias de temperatura en el gas circulante sin violar la segunda ley, se debe a la inapropiada "extrapolación" de una conclusión de ésta (válida para un sistema aislado en equilibrio) a uno que evidentemente no lo está (el gas en el interior del tubo). El funcionamiento del tubo depende de procesos irreversibles y fuera de equilibrio que ocurren dentro de un flujo de gas, de aquí que no sea posible analizar su funcionamiento

to usando los métodos de la termodinámica clásica, que sólo son estrictamente aplicables a procesos cuasiestáticos. El análisis del tubo requiere de la inclusión de la dinámica del fluido circulante; entonces, más que analizar termodinámicamente el proceso, lo que haremos será mostrar que la separación que efectúa el tubo de una masa de aire a temperatura ambiente en dos, una a alta y otra a baja temperatura, es posible sin violar la segunda ley de la termodinámica.

La segunda ley establece que en procesos en los que un sistema aislado pasa de un estado a otro de manera "espontánea" la entropía *nunca* puede disminuir. Basta mostrar entonces que el cambio de entropía ΔS_{R-H} que ocurre durante el proceso es positivo. Para calcular ΔS_{R-H} supondremos que, una vez que el tubo alcanza un estado estacionario (i.e., las paredes de éste se encuentran en equilibrio con el gas circulante) no se producen intercambios de calor entre el aire y las paredes del tubo. Esta suposición está de acuerdo con las ideas que se tienen sobre el mecanismo responsable del efecto Ranque-Hilsch (Cf. Sec. 2) y puesto que todo intercambio de energía se produce exclusivamente dentro del gas, nos permite considerar a éste como un sistema aislado durante su paso por el tubo. En estas condiciones, ΔS_{R-H} corresponderá únicamente al cambio de entropía que ocurre en el aire durante su paso por el dispositivo.

Si suponemos que el aire se puede considerar ideal y diatómico, el cambio de entropía por mol en un proceso que conecte un estado de temperatura y presión (T_i, P_i) con otro a temperatura y presión (T_f, P_f) es⁽¹⁴⁾:

$$\Delta S = (7/2) R \ln(T_f/T_i) - R \ln(P_f/P_i); \quad (1)$$

expresión que es aplicable a cualquier par de estados de equilibrio *i* y *f*, independientemente de cómo se haya pasado de uno a otro. Entonces, el cambio de entropía total por mol en el aire que circula por el tubo se puede expresar como la suma de los cambios que ocurren cuando una fracción μ del gas pasa del estado (T_0, P_0) al estado (T_f, P_A) y la fracción $1 - \mu$ restante pasa del mismo estado inicial al estado (T_C, P_A) ⁽¹⁵⁾; ambos cambios se pueden evaluar usando la Ec. (1), así obtenemos:

$$\Delta S_{R-H} = (7R/2) [\ln(T_C/T_0) + \mu \ln(T_F/T_C)] + R \ln(P_0/P_A), \quad (2)$$

donde P_0 es la presión con que se inyecta el gas y T_0 su temperatura, P_A la presión a la que sale el gas por ambos tubos y que tomaremos como la atmosférica, T_F (T_C) la temperatura del aire frío (caliente) y R la constante universal de los gases. Es conveniente enfatizar que como la entropía es una función de estado, para calcular el cambio de entropía que ocurre dentro del dispositivo, no es necesario conocer absolutamente nada de los procesos que ocurren en su interior, basta con conocer el estado termodinámico del gas que entra y el estado de cada fracción de gas que sale.

Si usamos en la Ec. (2) los valores experimentales que reportamos para T_F , T_C , T_0 y que corresponden a $P/P_A = 2.5$ y $\mu = 0.4$, se obtiene un cambio de entropía de $\Delta S_{R-H} = 8 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$. El incremento en la entropía del gas indica claramente la irreversibilidad del proceso que ocurre dentro del tubo.

Aun en las condiciones que reporta Hilsch⁽³⁾, donde $P/P_A = 10$, $\mu = 0.3$, $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $T_F = -30^\circ\text{C}$ y $T_C = +40^\circ\text{C}$, la Ec. (2) indica que $\Delta S_{R-H} = 19 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$ (el cambio de entropía) aumenta. Estos resultados para ΔS_{R-H} muestran que el funcionamiento del tubo de Ranque-Hilsch está en perfecto acuerdo con las predicciones de la segunda ley de la termodinámica.

Entre las aplicaciones prácticas del tubo se cuenta su uso como refrigerador en operaciones de maquinado y para protección de equipo eléctrico. Si se le considera como dispositivo refrigerante también es posible calcular en forma muy simple (véase Ref. 3) el coeficiente de rendimiento η de un tubo de Ranque-Hilsch:

$$\eta = \frac{T_0 - T_F}{T_0 \ln(T_0/T_F)} \quad (3)$$

Al comparar éste con el factor de rendimiento de un refrigerador de Carnot Carnot⁽¹⁴⁾,

$$\eta_C = \frac{T_F}{T_0 - T_F} \quad (4)$$

resulta entonces que el tubo de Ranque-Hilsch es superior a un refrigerador

de Carnot para temperaturas tales que $0.39 < T_F/T_0$.

4. CONCLUSIONES

Un tubo de Ranque-Hilsch puede constituir una excelente demostración en cursos de termodinámica, y tiene la gran ventaja de ser barato y de fácil construcción. Aun la parte más difícil de construir, la cámara de forma espiral, puede sustituirse por una de forma circular casi sin perjuicio para el funcionamiento del tubo. Por otra parte, el estudio detallado de las características de su funcionamiento podría ser una interesante alternativa a los ejercicios experimentales que se realizan en muchos cursos de laboratorio.

Un proyecto centrado en la construcción y caracterización del tubo enfrentaría a los alumnos a verdaderos problemas experimentales: ¿Cómo medir la temperatura del aire en los tubos? ¿Cómo medir el flujo de aire que sale? ...

Hay muchas cosas que se podrían estudiar, cada una de las cuales podría bastar para un proyecto. ¿Cómo dependen las temperaturas máxima y mínima que se alcanzan de la presión de entrada? ¿Cuál es el efecto del tamaño del diafragma? ¿Cuál es la forma del flujo en el interior del tubo? ...

En resumidas cuentas creemos que este dispositivo ofrece muchas posibilidades para la enseñanza y por lo tanto que debería ser más conocido (y usado) por los profesores de física.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a H.N. Núñez Yépez su valiosa cooperación para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

1. Harry F. Meiners (ed.), *Physics Demonstration Experiments*, The Ronald Press, New York (1970).
2. Desafortunadamente hay pocos experimentos diseñados expresamente para ilustrar las leyes termodinámicas, la única referencia que conocemos

- en este sentido es: Gupta, *et. al.*, *Am. J. Phys.*, 52 (1984) 625.
3. R. Hilsch, *Rev. Sci. Instrum.*, 18 (1947) 108.
 4. M.G. Ranque, *J. Phys. et Rad.*, 4 (1933) 112.
 5. Véase la descripción del experimento en las contribuciones de R.J. Eden, J.C. Polkinghorne y J. Mehra en *Aspect of Quantum Theory*, A. Salam y E.P. Wigner (eds.), Cambridge University Press, Cambridge (1972).
 6. M.P. Blaver, *J. Sci. Instrum.*, 27 (1950) 168; D. Ter Haar y H. Wergerland, *Forth. Long. Norske. Vid. Selskat.*, 20 (1947) 55; J.J. Van Deemter, *Appl. Sci. Res.*, A3 (1952) 174; R.G. Deissler y M. Perlmutter, *Int. J. Heat Mass Transfer.*, 1 (1960) 173; J.M. Savino y R.G. Ragsdale, *Trans. A.S.M.E.C., J. Heat Transfer.*, 83 (1961) 33; C.U. Kinderstron-Lang, *J. Fluid Mech.*, 45 (1971) 161; M. Kurosaka, *Phys. Today*, 37 (1984) S34.
 7. M. Sibulkin, *J. Fluid Mech.*, 12 (1962) 269.
 8. M. Kurosaka, *J. Fluid Mech.*, 124 (1982) 139.
 9. G.O. Smith, *Sci. Am.*, 199 (1958) 145.
 10. T.B. Brown (ed.), *Advanced Undergraduate Laboratory Experiments in Physics*, Lloyd W. Taylor Manual, Addison-Wesley, Reading, Mass. (1959).
 11. J. Walker, *The Flying Circus of Physics*, John Wiley, New York (1977) p. 97.
 12. No es posible tener presiones superiores a las 2.5 atm en las líneas de aire comprimido de la Facultad de Ciencias. Para probar el tubo a 5 atm lo adaptamos a la salida de un tanque de nitrógeno y lo operamos a la presión de éste. Esta prueba se hizo en un laboratorio fuera de la Facultad y en estas condiciones no pudimos realizar ni una prueba prolongada, ni medir con precisión la temperatura.
 13. La otra motivación fue la fascinación que nos causó leer sobre el funcionamiento del dispositivo en la Ref. 8. Creémos que esta fascinación se puede transmitir fácilmente a los estudiantes.
 14. L. García-Colín, *Introducción a la Termodinámica Clásica*, Trillas, México, D.F. (1972) p. 95.
 15. El aire que sale de los tubos C y F se puede considerar en estado de equilibrio:
El aire se puede dirigir al interior de un frasco Dewar para almacenar lo a la presión atmosférica y medir su temperatura.