

Construcción y caracterización de un tubo Ranque-Hilsch

(Construction and characterization of a Ranque-Hilsch tube)

O.J. García Contreras, Jorge E. Muñoz Bravo y F. Fajardo¹

Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Recibido em 24/4/2008; Aceito em 4/7/2008; Publicado em 27/2/2009

El fenómeno de distribución de temperatura en un flujo de gas rotante es conocido como el efecto Ranque-Hilsch. El tubo Ranque-Hilsch (*R-H*) es un sistema que en ausencia de partes móviles separa un flujo de aire en dos porciones, fría y caliente. En este trabajo un tubo *R-H* es construido utilizando piezas de bajo costo. Nosotros mostramos el efecto que tiene variar algunos de sus parámetros como: la longitud del tubo, el diámetro de salida de aire frío y el diámetro de una válvula cilíndrica en el gradiente de temperatura generado en los extremos. Como resultado se obtiene una configuración del tubo que optimiza la diferencia de temperatura del flujo. El tubo *R-H* es construido con materiales de bajo costo y fáciles de conseguir, lo cual facilita su montaje para ilustrar fenómenos de fluidos en los laboratorios de mecánica de fluidos y termodinámica en las carreras de ingeniería y física.

Palabras-clave: Efecto Ranque-Hilsch, flujo de vórtice, separación de temperatura.

The phenomenon of temperature distribution in a rotating gas flow is known as the Ranque-Hilsch effect. The Ranque-Hilsch tube (*R-H*) is a system that in absence of movable parts separates an air flow in two portions, cold and hot ones. In this work a *R-H* tube is constructed using low cost pieces. We showed that effect is dependent of some of its parameters like the: tube length, the exit diameter of cold air and the diameter of a cylindrical valve in the temperature gradient generated at its ends. As result a configuration of the tube is obtained that optimizes the temperature difference of the flow. The *R-H* tube is constructed with materials of low cost and easy to obtain, which facilitates its assembly in order to illustrate some phenomena in fluid mechanics and thermodynamics labs in engineering and physics courses.

Keywords: Ranque-Hilsch effect, vortex flow, temperature separation.

1. Introducción

El tubo de vórtice fue inventado en 1928 por George Ranque, cuando notó un gradiente de temperatura en éste sin necesidad que alguna parte mecánica estuviera presente [1, 2]. En 1945 Rudolph Hilsch, publicó varios artículos sobre los efectos que se obtenían para diferentes dimensiones del dispositivo [3]. El tubo Ranque-Hilsch (*R-H*) es un dispositivo que separa en ausencia de partes móviles, un flujo de aire en dos porciones; una más caliente y una más fría [4]. Aire (en general, el gas de interés) es introducido dentro de un tubo abierto en sus extremos mediante una boquilla tangencial al tubo. Como resultado de lo anterior, se generan dentro del tubo flujos en forma de torbellino (ver Fig. 1). Un orificio cercano a la boquilla de entrada permite la salida del aire frío, el extremo opuesto permite la salida del aire caliente [5].

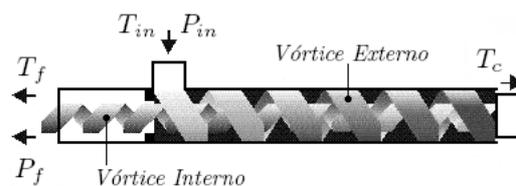


Figura 1 - Ilustración del efecto Ranque-Hilsch, donde T_{in} y P_{in} son respectivamente la temperatura y presión inicial del flujo inyectado, T_c la temperatura del flujo caliente, T_f y P_f son respectivamente la temperatura y la presión del flujo frío.

Existen varias teorías concernientes a la dinámica del tubo *R-H* [6]. Aquí expondremos una breve explicación del fenómeno. Al entrar el aire al tubo se generan flujos en forma de torbellino los cuales viajan en direcciones contrarias, a la misma velocidad angular. Por el principio de conservación del momento angular la velocidad rotacional del vórtice interno (Fig. 1) debería aumentar, pero en el tubo la velocidad de vórtice

¹E-mail: fefajardot@unal.edu.co.

permanece igual. El momento angular que el vórtice interno deja de ganar, se manifiesta en el vórtice exterior en forma de calor. Así, el vórtice exterior se calienta y el interno se enfría. Debido a que el flujo es turbulento, remolinos pueden viajar de un vórtice al otro. De esta forma, microvolúmenes del fluido viajan desde el centro hacia el exterior (en la cual la presión relativa es mayor), los cuales son comprimidos produciendo calentamiento, mientras que los microvolúmenes que se mueven hacia el centro del tubo disminuyen su presión, por lo que sufren enfriamiento.

El área de aplicación práctica del efecto de vórtices es amplia: desde el enfriamiento de dispositivos industriales [7], interconexión de equipos trabajando a diferentes temperaturas [8], sistemas de combustión [9], separación de flujos [10, 11], hasta la entrega de aire caliente para la cavidad oral [12]. Además, el tubo de vórtices es una esperanza de uso en sistemas de refrigeración limpios, sencillos y aplicables al aire acondicionado [13]. Debido a estas posibles aplicaciones el tubo *R-H*, en especial, los sistemas de refrigeración no perjudiciales al medio ambiente, en este trabajo se ilustra el fenómeno construyendo el tubo a muy bajo costo.

A continuación se indica sucintamente cómo se obtiene una expresión que modela el tubo *R-H*, relacionando algunas de las variables que influyen en su funcionamiento. El análisis dimensional del tubo [14] muestra que la relación funcional para su descripción, en términos de la diferencia de temperatura entre el aire inyectado y la porción de aire frío ΔT_f , es de la forma

$$\frac{\Delta T_f}{T_{in}} = f\left(\frac{P_{in}}{P_f}, \mu_f\right), \quad (1)$$

siendo respectivamente T_{in} , P_{in} la temperatura y la presión de entrada (aire inyectado), P_f la presión de la porción fría y $\mu_f = \dot{m}_f/\dot{m}_{in}$ la fracción de flujo de masa inyectada que pasa por la salida de aire frío.

Considerando un modelo en términos de la cantidad de flujo de calor y que el flujo radial y circular en el vórtice son independientes, se puede mostrar que la diferencia de temperatura entre las porciones caliente y fría ΔT toma la forma

$$\Delta T = \alpha \cdot \ln P_{in} + \beta, \quad (2)$$

donde las variables α y β dependen de la temperatura del aire inyectado T_{in} , la temperatura del flujo que pasa por la salida de aire caliente T_c , la temperatura de la porción fría T_f y de la geometría del tubo *R-H*.

2. Experimento

La Fig. 2 ilustra el diseño del tubo Ranque-Hilsch. El tubo *R-H* consiste en un tubo de longitud L y diámetro d_1 , el cual posee una boquilla tangencial para el ingreso de aire. Junto a la boquilla se ubica un diafragma cuyo diámetro interior es d_f . En el extremo opuesto se ubica

una válvula que puede ser de forma cónica [15-17] ó cilíndrica [5], de diámetro d'_1 .

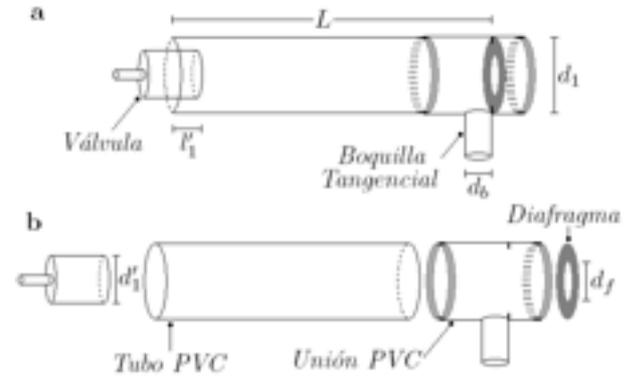


Figura 2 - a) Esquema del tubo *R-H*. b) Despiece del tubo *R-H*, donde: d'_1 es el diámetro de la válvula de control, d_1 es el diámetro del tubo, d_f es el diámetro del diafragma, d_b es el diámetro de la boquilla tangencial, l'_1 es la distancia que ingresa la válvula de control y L es la longitud del tubo.

Para la realización del montaje experimental fue necesario tener presente que las piezas empleadas fueran de bajo costo y de fácil construcción, por lo que se prefiere trabajar con válvulas cilíndricas. El tubo Ranque-Hilsch se construyó a partir de un tubo y un acople de *PVC* al cual se le insertó una boquilla tangencial metálica. También fue necesaria la construcción de dos soportes que brindaran estabilidad al sistema: uno para el tubo y el otro para las válvulas.

Con el fin de controlar el flujo de aire que pasa a través de la salida de aire caliente, se diseñaron válvulas cilíndricas de diferentes diámetros (d'_1). Las válvulas fueron hechas de yeso, lo que permite variar fácilmente el diámetro de cada válvula. La salida de aire frío (d_f) fue diseñada a partir de diafragmas metálicos (arandelas) con diferentes orificios de salida. La temperatura se midió mediante una termocupla. Para la medida de las presiones se utilizó un manómetro. El suministro del aire inyectado se obtuvo de un compresor. Una fotografía del montaje experimental completo del tubo Ranque-Hilsch se presenta en la Fig. 3.

Durante la medición se deben tener en cuenta ciertos cuidados como: el tubo y la válvula de control deben estar sobre el mismo eje de simetría, las piezas deben ser simétricas y la temperatura debe ser medida en el mismo punto. Además, se recomienda el uso de un protector para los oídos, debido al alto grado de ruido producido por el suministro de aire.

Algunos parámetros que permanecieron invariables en el experimento fueron: el diámetro de la boquilla de entrada $d_b = 0.725$ cm, el diámetro del tubo *R-H* $d_1 = 2.910$ cm y la distancia que ingresa cada válvula cilíndrica en el tubo, $l'_1 = 0.4$ cm. La temperatura inicial en cada medida de datos es $T = 22$ °C y la presión inicial es el valor de la presión atmosférica de Bogotá (altura 2640 m sobre el nivel del mar) $P_{in} = 0.75$ bar. Los parámetros que se variaron fueron: diámetro de la

válvula cilíndrica d'_1 , diámetro del diafragma d_f y la longitud L del tubo.

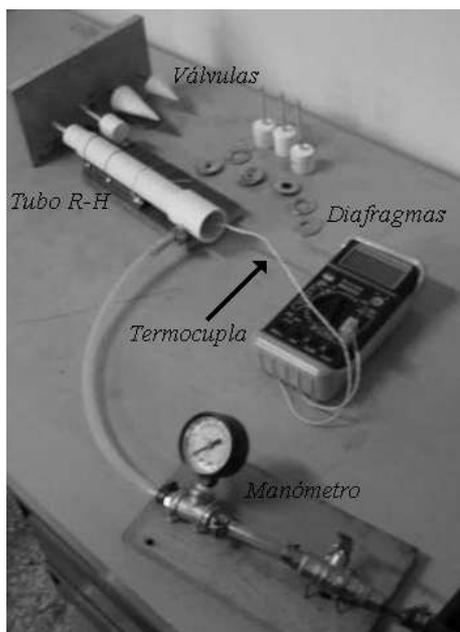


Figura 3 - Montaje experimental, instrumentos de medida y piezas empleadas.

Para cada configuración se toma lectura de la presión inyectada, que es el valor medido con el manómetro, más la presión atmosférica y se mide la temperatura en los extremos del tubo *R-H*; para T_f se coloca la punta de la termocupla en el centro del diafragma y para T_c se ubica la punta entre el borde del tubo y la válvula cilíndrica. De esta forma se tendrán gráficas de temperatura en función de la presión absoluta.

3. Resultados

3.1. Variación de d'_1

Para $L = 21.0$ cm y $d_f = 1.335$ cm se varía el diámetro de la válvula cilíndrica de control del flujo de aire. La Fig. 4 muestra las diferencias en temperatura, $\Delta T = T_c - T_f$, en función de la presión del aire de entrada para cada una de las válvulas utilizadas. Podemos observar que el tubo tiene una mayor diferencia de temperatura en sus extremos, para las válvulas de mayor diámetro ($d'_1 = 2.730$ cm y $d'_1 = 2.702$ cm). Por este motivo, estos serán los valores para d'_1 en las próximas variaciones de las dimensiones del tubo. En la Fig. 4, se observa también una limitación en el funcionamiento del tubo para valores menores a $d'_1 = 2.580$ cm, ya que se tienen valores de $\Delta T < 0$, lo cual es debido a otros fenómenos, como el efecto Joule-Thomson [18]. En este fenómeno se expande un gas altamente comprimido a temperatura ambiente por una boquilla, con el resultado de una disminución en la temperatura de la boquilla. También se observó que al incrementar el

diámetro de la válvula d'_1 el flujo en la salida de aire frío aumenta, mientras que en la salida de aire caliente disminuye y viceversa.

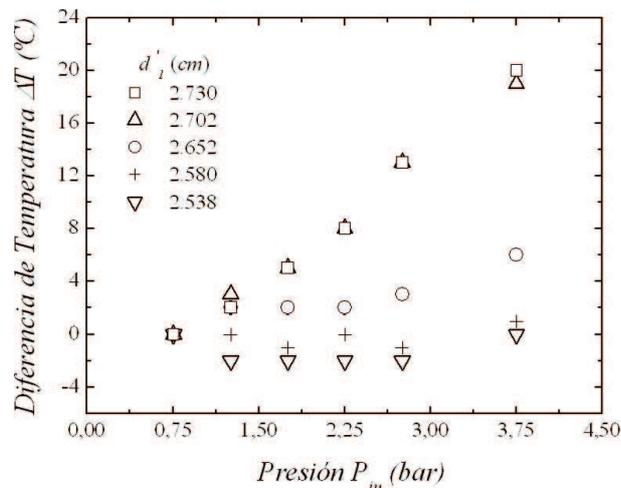


Figura 4 - Diferencia de temperatura (ΔT) entre los extremos del tubo al variar la presión inyectada P_{in} para diferentes valores de diámetro de la válvula d'_1 .

Con la finalidad de ilustrar explícitamente la diferencia entre T_f y T_c , la Fig. 5 muestra estos valores para dos válvulas diferentes: $d'_1 = 2.730$ cm y $d'_1 = 2.652$ cm. Para estos dos casos se evidencia que los mayores valores de T_c y los valores más pequeños para T_f se obtienen con la válvula de mayor diámetro, $d'_1 = 2.730$ cm. Además, de la gráfica se puede concluir que el diámetro de la válvula permite ajustar los rangos de temperatura en que opera el tubo para cierta presión de entrada. Con lo que se tiene que al disminuir d'_1 se aumenta la temperatura T_f y T_c disminuye; y que al aumentar d'_1 se incrementa T_c y T_f disminuye.

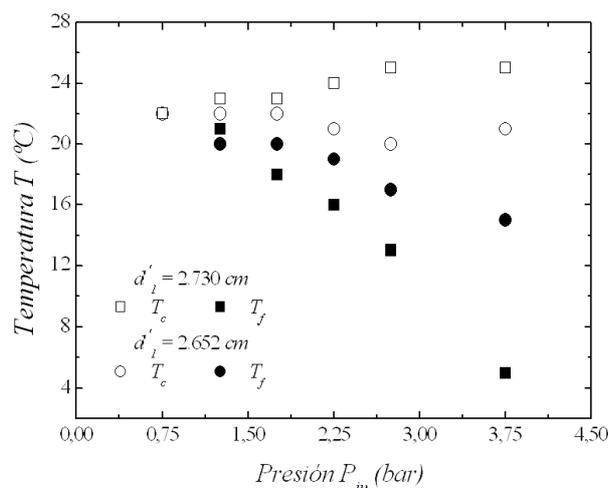


Figura 5 - Temperatura de los flujos de salida caliente T_c y frío T_f al variar la presión de entrada P_{in} para las válvulas de diámetros $d'_1 = 2.730$ cm y $d'_1 = 2.652$ cm.

3.2. Variación de d_f

La diferencia de temperatura entre los extremos del tubo en función de la presión para las variaciones del diámetro del diafragma d_f se ilustra en la Fig. 6, para $d'_1 = 2.730$ cm y $L = 21.0$ cm. Al comparar las variaciones de temperatura para cada serie de datos de d_f , se tiene que la mayor diferencia de temperatura fue en $d_f = 0.750$ cm. Nótese que para valores menores a este diámetro, la diferencia de temperatura es menor que cuando se compara con los diámetros mayores al d_f óptimo.

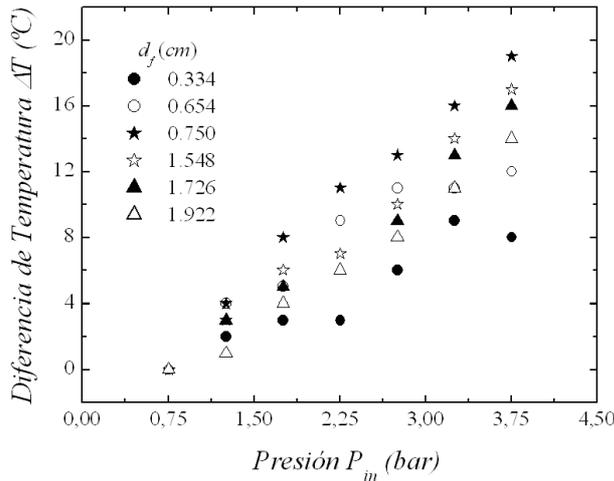


Figura 6 - Variación de la diferencia de temperatura ΔT al cambiar la presión inyectada P_{in} para diferentes valores de d_f , con $L = 21.0$ cm y $d'_1 = 2.730$ cm.

3.3. Variación de L

Considerando los valores de d'_1 y d_f ($d'_1 = 2.730$ cm y $d_f = 0.750$ cm) que optimizan la diferencia de temperatura entre T_c y T_f , se varía la longitud del tubo L . Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 7. Observe que para la longitud más grande se obtiene una mayor eficiencia del tubo, debido a que la diferencia de temperatura crece más rápido que en los otros casos.

Así, los valores geométricos del tubo $R-H$ obtenidos para su optimización según el análisis dimensional llevado a cabo son: $d'_1 = 2.730$ cm, $d_f = 0.750$ cm y $L = 21$ cm. El estudio completo de la toma de datos y de la experiencia, conduce a decir que el valor T_c para diferentes configuraciones no se incrementó drásticamente como T_f debido a la absorción de calor por parte del tubo.

Finalmente, la expresión (2) establece una relación logarítmica entre la diferencia de temperatura ΔT y la presión. En la Fig. 8 mostramos este ajuste (línea continua) con un coeficiente de correlación $R^2 = 0.986$ para los parámetros óptimos encontrados. Esta tendencia sería mucho más clara si se pudiera hacer las variaciones de presión por lo menos hasta 8 bar [19]. Al aumentar la presión de entrada la temperatura del

flujo de aire frío T_f disminuye, mientras que la temperatura del flujo caliente T_c aumenta en muy poco, lo cual es debido principalmente a convección entre la porción de aire caliente y el tubo. Además, se puede observar que la diferencia de temperatura ΔT varía de forma logarítmica, lo cual está de acuerdo con el modelo propuesto en (2), con $\alpha = 11.26$ °C y $\beta = 2.53$ °C.

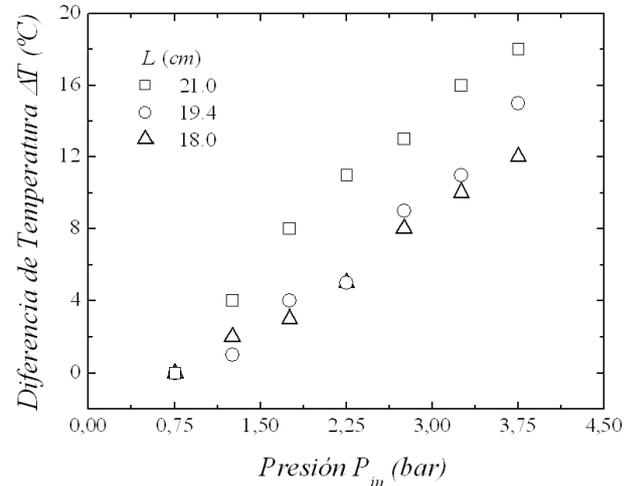


Figura 7 - Diferencia de temperatura al variar la presión de entrada para tres longitudes del tubo.

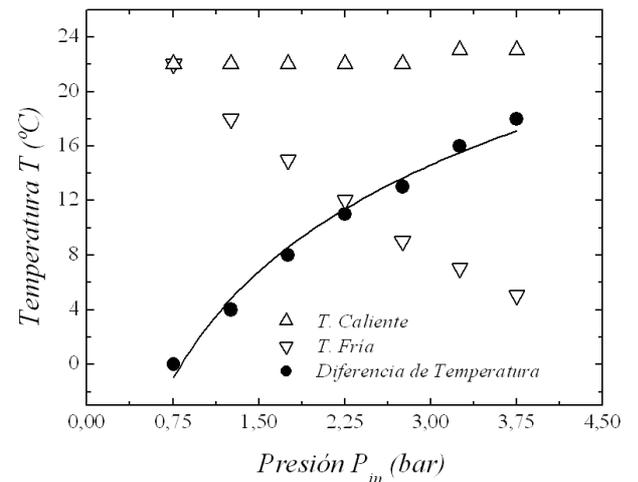


Figura 8 - Variación de la temperatura de los flujos de salida caliente T_c , frío T_f y la diferencia de temperatura, en términos de P_{in} para los parámetros óptimos de construcción ($d'_1 = 2.730$ cm, $d_f = 0.750$ cm y $L = 21.0$ cm).

Conclusiones

La válvula cilíndrica sirve de control de la temperatura y del flujo de las porciones de aire frío y caliente. Sucediendo que al disminuir el diámetro de la válvula se reduce el flujo de aire frío y se incrementa la temperatura por esta salida, mientras que en la salida de aire caliente el flujo aumenta y la temperatura disminuye. Sucede al contrario cuando se incrementa el diámetro de la válvula.

Para las dimensiones del tubo $R-H$ optimizadas, se evidencia un comportamiento logarítmico de $\Delta T(P_{in})$, constatando el modelo de flujos independientes. Aunque esto no se reflejó para todos los parámetros estudiados, debido a la limitación para alcanzar valores mayores en la presión de entrada.

El mejor funcionamiento del dispositivo fue en el caso en que la diferencia entre el radio de la válvula y del tubo es aproximadamente 1 mm, además cuando la razón entre el diámetro del tubo y del diafragma es cercana a cuatro. También se encontró que al incrementar la longitud del tubo la diferencia entre el flujo de aire frío y caliente es cada vez mayor.

Con el fin de lograr un mejor valor en T_c se recomienda inspeccionar la simetría que necesita el montaje y se aconseja fabricar el tubo con materiales aislantes al calor, aumentando también la diferencia de temperaturas.

Se logró construir un dispositivo accesible a los laboratorios de enseñanza de la física, por su bajo precio de construcción y por la facilidad de adquirir los materiales. El cual permite observar y analizar la influencia de las dimensiones del tubo de $R-H$ en las áreas de mecánica de fluidos y termodinámica.

Agradecimientos

Agradecemos al Prof. Jairo Roa Rojas por sus comentarios al presente trabajo.

Referencias

- [1] G.J. Ranque, *Le Journal de Physique et le Radium* **4**, 112, S-115, (1933). También traducido al inglés por General Electric Co., Schenectady Works Library, T.F. 3294 (1947).
- [2] G.J. Ranque, United States Patent, n. 1,952,281 (1934).
- [3] R. Hilsch, *Review of Scientific Instruments* **18**, 108 (1947).
- [4] J.R. Buchler y S. A. Colgate, *Annals of the New York Academy of Sciences* **898**, 105 (2000).
- [5] C. Gao, *Experimental Study on the Ranque-Hilsch Vortex Tube* (Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2005).
- [6] D.I. Pullin y P.G. Saffman, *Annual Review of Fluid Mechanics* **30**, 31 (1998).
- [7] D.T. Williams, *Ranque-Hilsch Vortex Tube for Refrigeration in Developing Communities* (Dissigno, California, 2005).
- [8] R.J. Ebmeier, S.E. Whitney, A. Sarkar, M. Nelson, N. Padhye, G. Cogos y H. J. Viljoen, *Ranque-Hilsch Vortex Tube Thermocycler for Fast DNA Amplification and Real-Time Optical Detection* (University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, 2004).
- [9] I. Matveev y S. Serbin, *Experimental and Numerical Definition of the Reverse Vortex Combustor Parameters* (AIAA, Ukrainian State Maritime Technical University, Nikolaev, 2006).
- [10] K.T. Raterman, M. McKellar, A. Podgomey, D. Stacy y T. Turner, *A Vortex Contactor for Carbon Dioxide Separations* (Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, Idaho Falls).
- [11] A.M. Crocker, S.M. White y F. Bremer, *Experimental Results of a Vortex Tube Air Separator for Advanced Space Transportation* (AIAA, University of Washington, Seattle, 2003).
- [12] J.V. Black y P.D. Sturges, United States Patent, n. 4,973,246 (1990).
- [13] G. Muffly, United States Patent, n. 3,012,412 (1961).
- [14] T. Cockerill, *Thermodynamics and Fluid Mechanics of a Ranque-Hilsch Vortex Tube*. Tesis de Maestría, Department of Engineering, University of Cambridge, 1998.
- [15] M. Ting-Quan, Z. Qing-Guo, Y. Jian, Y. Fang y M. Chong-Fang, *Experimental Investigation on Energy Separation by Vortex Tubes* (College of Environmental and Energy Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing).
- [16] P. Promvongse y S. Eiamsa-ard, *Science Asia* **31**, 215 (2005).
- [17] P.K. Singh, R.G. Tathgir, D. Gangacharyulu y G.S. Grewal, *Journal of the Institution of Engineers (India)* **84**, 149 (2004).
- [18] O.C. Bridgeman, *Physical Review* **34**, 527 (1929).
- [19] V. Bezprozvannykh y H. Mottl, *Eleventh Annual Conference of the CFD Society of Canada* **2**, 651 (2003).