



ESTUDIO COMPARATIVO DEL FUNCIONAMIENTO DE TUBOS DE CALOR EN COBRE Y VIDRIO

E. Frigerio, I. De Paul, J. Quintana

Universidad Nacional de Salta - Av. Bolivia 5150 - 4400 Salta

TE: 387-255424 - E-mail: frigerio@unsa.edu.ar

RESUMEN: Se estudió el comportamiento de un tubo de calor hecho en cobre y se comparó su funcionamiento con un tubo hecho en vidrio. Ambos funcionaron asistidos por la gravedad, con agua destilada como fluido de transferencia. Se realizaron experiencias en las cuales se prepararon ambos tubos de igual manera, midiendo temperaturas. Se filmaron y fotografiaron las experiencias que muestran el funcionamiento pulsante del de vidrio. La comparación de las medidas térmicas muestra que el de cobre es pulsante como el de vidrio, transfiriendo energía en forma de calor latente del vapor y sensible de volúmenes de agua desplazados con fuerza hacia arriba. Se calcularon las resistencias térmicas y los coeficientes globales de transferencia de los tubos de calor para las distintas potencias suministradas al evaporador. Los resultados muestran que la teoría convencionalmente aceptada para describir el funcionamiento de tubos de calor no contempla este comportamiento y debe ser revisada.

Palabras clave: termodinámica, tubo de calor asistido por la gravedad, transferencia de energía

INTRODUCCIÓN

El tubo de calor (heat pipe, HP) es un dispositivo para evacuación rápida de energía térmica, cuyas aplicaciones se extendieron a partir de la década del 60 a distintas áreas tales como las energías renovables, la electrónica, la energía nuclear, la tecnología espacial, etc. La bibliografía tradicional (Chi, 1976, Dunn y Reay, 1976, Ivanovsky, 1982, Khandekar, 2004, Liao et al. 2007) describe el funcionamiento de los heat pipes de la forma siguiente. El HP consiste en un tubo cerrado o cámara de diferentes geometrías con una mecha adosada a su pared interna y un líquido en equilibrio con su vapor. El calor latente de éste es el responsable de la transferencia: en un extremo (sección evaporadora, E) el líquido absorbe calor transportando calor al otro extremo en forma de vapor. Aquí, en la sección condensadora (C), el fluido se condensa entregando calor. El condensado vuelve por la mecha al extremo inicial cerrando el ciclo. La mecha sirve para el regreso del líquido por capilaridad cuando el tubo de calor opera horizontalmente. La cantidad de calor que puede transportar como calor latente de vaporización usualmente es varios órdenes de magnitud más grande que el que puede ser transportado como calor sensible en un sistema convectivo convencional, lo que permite diseños comparativamente más pequeños. Además, debido a su estructura de mecha delgada y a la pequeña caída de temperatura en el flujo de vapor, los tubos de calor tienen características térmicas mucho mejores que cualquier sólido conocido. Cuando se utilizan estos dispositivos en forma vertical, el regreso del líquido se realiza por gravedad y la mecha no es necesaria ya que el efecto de bombeo capilar es muy pequeño frente a la fuerza de gravedad. A estos tubos que se comportan como un termosifón se los denomina tubos de calor asistidos por la gravedad ("gravity assisted heat pipes") (Anwarul Hasan et al., 2003, Joudi y Witwit, 2000).

Las características de funcionamiento de estos tubos dependen del tamaño, forma y material usado así como de la construcción, fluido de trabajo y del flujo de calor; poseen limitaciones a la transferencia de calor y algunas veces una dinámica de arranque problemática. (Khandekar, 2004, Shafii et al., 2002, Khandekar et al. (a), 2003, Charoensawan et al. 2003, Khandekar et al. (b) 2003).

Experiencias anteriores de visualización de flujos realizadas en un tubo de vidrio mostraron que esta descripción tradicional no se ajusta a lo observado, habiéndose detectado el carácter pulsante del funcionamiento de este HP, manifestando un correlato claro con las medidas térmicas realizadas (Frigerio et al. 2009, De Paul et al. 2009). Se planteó así el interrogante acerca de si los HP realizados en otros materiales que no permiten ver qué ocurre en su interior tendrían un comportamiento similar. En función de esto, el objetivo planteado en este trabajo fue realizar el estudio comparativo del comportamiento termo-fluidodinámico de tubos de calor asistidos por la gravedad de cobre y vidrio ante las mismas condiciones de trabajo, empleando el de vidrio como referencia por permitir la visualización de flujos.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Se disponía de un tubo de calor de 0,66 m construido con una bureta de vidrio que brinda la ventaja de ser transparente, condición indispensable para realizar experiencias de visualización de flujos, y de mostrar una escala que permite realizar una medida precisa del volumen de líquido en su interior y de la posición de los meniscos de agua que contribuyen a la transferencia térmica. Se comparó su funcionamiento con el de un tubo de calor de cobre de 0,75 m de longitud, cargados ambos con agua destilada; el proceso de carga se describió en (Frigerio et al. 2009, Frigerio 2001). La figura 1 muestra un esquema de funcionamiento de los tubos de calor. Las características de ambos tubos se especifican en la Tabla I.

| | | | | Con aislacion | |
|------------------------------|--------|----------|----------|---------------|----------|
| | | Vidrio | Cobre | Vidrio | Cobre |
| Diámetros [m] | | | | | |
| Externo | Dext | 0,014 | 0,015 | | |
| interno | Dint | 0,01128 | 0,013 | | |
| espesor | e | 0,00272 | 0,0022 | | |
| Longitudes [m] | | | | | |
| evaporador | Le | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| adiabática | La | 0,05 | 0,05 | 0,40 | 0,49 |
| condensador | Lc | 0,54 | 0,63 | 0,14 | 0,14 |
| Total | Lt | 0,66 | 0,75 | | |
| Áreas [m²] | | | | | |
| Evaporador | Ae | 5,28E-03 | 5,65E-03 | 5,28E-03 | 5,65E-03 |
| Condensador | Ac | 2,38E-02 | 2,97E-02 | 6,16E-03 | 6,60E-03 |
| Fracción de llenado % | | 18,2 | 12,1 | | |
| Propiedades | | | | | |
| Cp | kJ/kgK | 0,836 | 0,389 | | |
| k | W/mK | 1,05 | 380 | | |
| ro | kg/m3 | 2500 | 8940 | | |

Tabla I. Características constructivas de los tubos de calor.

Se empleó como fuente caliente agua termostatzada colocada en dos termos iguales provistos de una tapa de poliuretano expandido de alta densidad que permite introducir los tubos de calor y las termocuplas. Se midió la temperatura en los extremos inferior ($T_{\text{evaporador}}$), medio (T_{medio}) y superior ($T_{\text{condensador}}$), así como la del agua en el termo (T_{agua}) y la temperatura ambiente (T_{ambiente}) empleando un sistema de adquisición de datos Omega DaqPro 5300, con intervalos de medida de 10 segundos. Se fotografió y se filmaron las experiencias empleando una cámara fotográfica convencional Sony. La figura 3 muestra una imagen de la disposición experimental de los tubos, los termos y las termocuplas de medida.

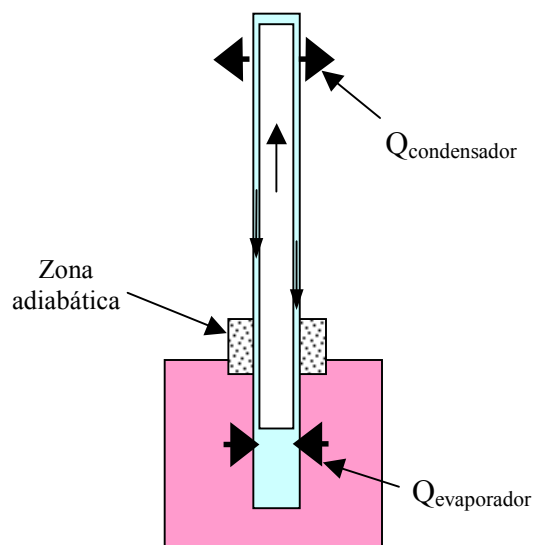


Figura 1. Esquema de funcionamiento de un tubo de calor asistido por la gravedad.

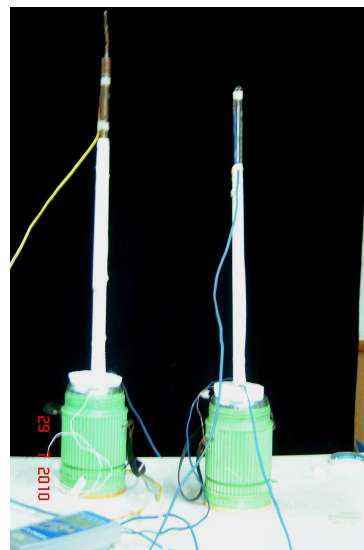


Figura 2. Serie 3, HP aislados.

ENSAYOS REALIZADOS

Se realizaron varias series de medidas de las cuales se presentan acá las tres más significativas. Las dos primeras, Serie 1 y Serie 2 con la sección condensadora completa expuesta al ambiente del laboratorio, mientras que en la Serie 3 se aisló ligeramente los tubos con papel, a fin de determinar su influencia en el funcionamiento (figura 2). En este caso sólo quedó expuesta al ambiente una longitud de 0,14 m en el de cobre y 0,135 m en el de vidrio, es decir un 19% promedio de la longitud total.

Se precalentaron primero los termos y a continuación se agregó al mismo tiempo 750 cm³ de agua a la misma temperatura, entre 75°C y 80°C en las diferentes series, midiéndose las temperaturas por un lapso de alrededor de 4 hs en intervalos de 10 segundos.

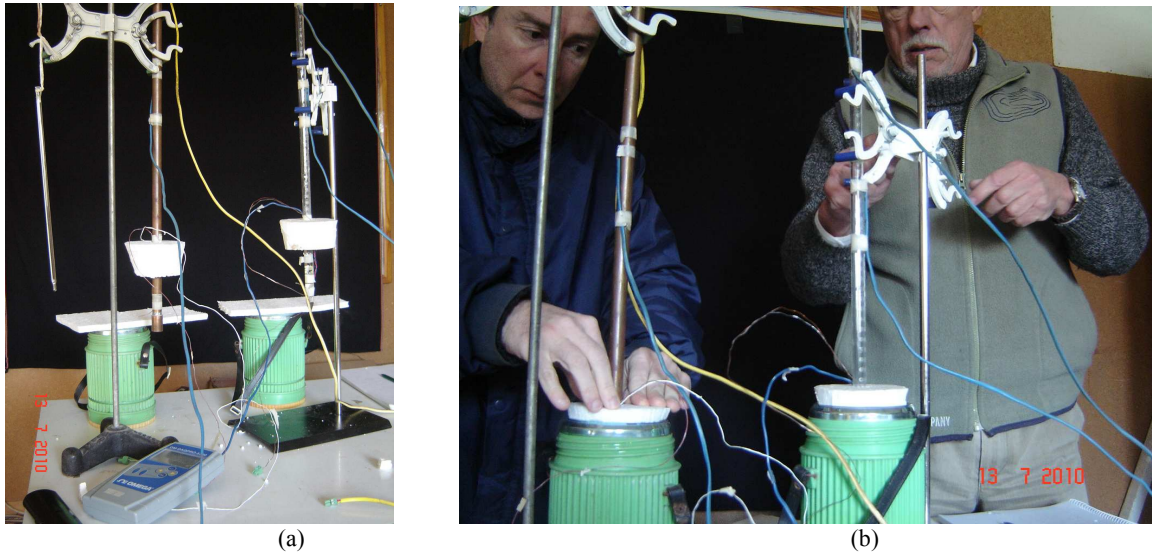


Figura 3 Disposición experimental de los tubos, de cobre y vidrio, termos y termocuplas de medida, a) fuera de los termos y b) en posición normal de operación.

RESULTADOS DE LAS MEDIDAS

A modo de ejemplo se presentan en las figuras 4 a y b las temperaturas medidas en cobre y en vidrio en la serie 2. En todas las experiencias se observó un comportamiento similar en ambos tubos de calor, con cuatro intervalos de características bien definidas. Al comienzo hay un transitorio de calentamiento en el que se evidencia la fuerte absorción de calor por parte del cobre, lo que reduce la temperatura inicial del agua unos 6°C. A continuación se ve un rango donde las temperaturas disminuyen linealmente con oscilaciones de alta frecuencia, seguida por una región de fuertes oscilaciones pero más esporádicas. Finalmente se tiene un descenso sistemático sin oscilaciones significativas.

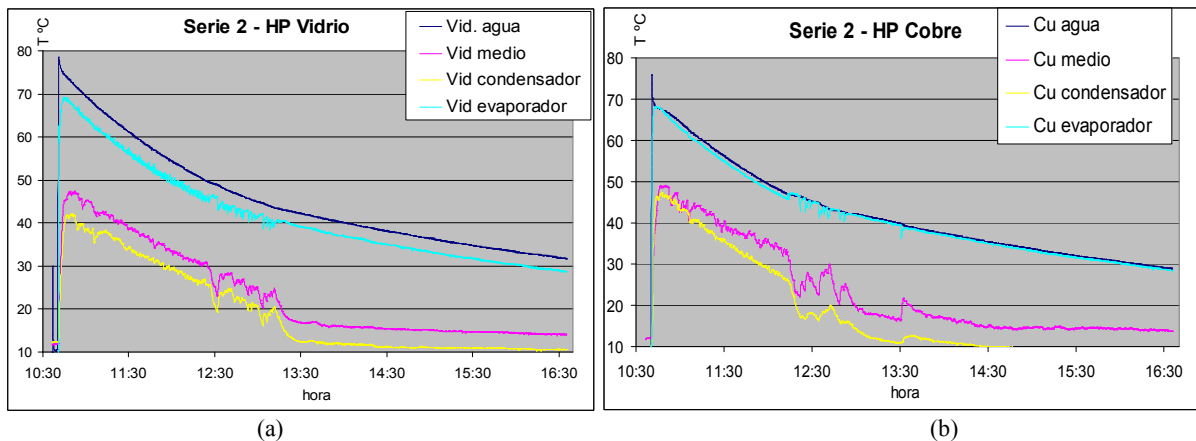


Figura 4. Temperaturas medidas en a): el HP de vidrio y b): el HP de cobre, en la serie 2.

La primera observación es que tanto el HP de cobre como el de vidrio presentan un comportamiento pulsante en las medidas térmicas, en correlación con lo que se visualizó en el HP de vidrio. Se aprecia claramente una disminución en la temperatura del evaporador cuando se forma una burbuja, acompañada de un aumento de temperatura en el condensador y el punto medio asociado a la llegada de la burbuja a esas posiciones.

Los resultados de las medidas de la serie 3 con los HP aislados se muestran en las figuras 5 a y b. También se observan intervalos característicos pero las oscilaciones son mucho menos intensas que en las series 1 y 2.

La figura 6 a y b muestra las diferencias de temperatura entre el agua y el evaporador (agua-E), entre el evaporador y el punto medio del tubo (E-M), entre el punto medio y el condensador (M-C) y entre el evaporador y el condensador (E-C), que muestran más claramente los distintos intervalos de funcionamiento característico mencionados anteriormente. Se observan pulsaciones de alta frecuencia a lo largo del rango lineal seguidas de pulsaciones más intensas pero menos frecuentes hasta alcanzar un régimen estable. En la serie 3 se diferencian también los tres intervalos pero la amplitud de las oscilaciones es mucho menor.

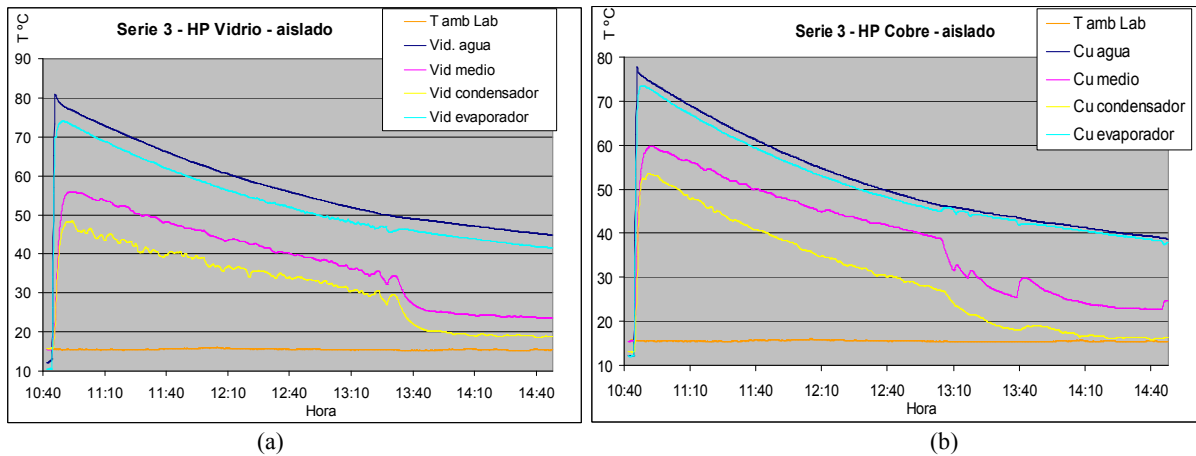


Figura 5. Temperaturas medidas en a): el HP de vidrio y b): el HP de cobre, serie 3.

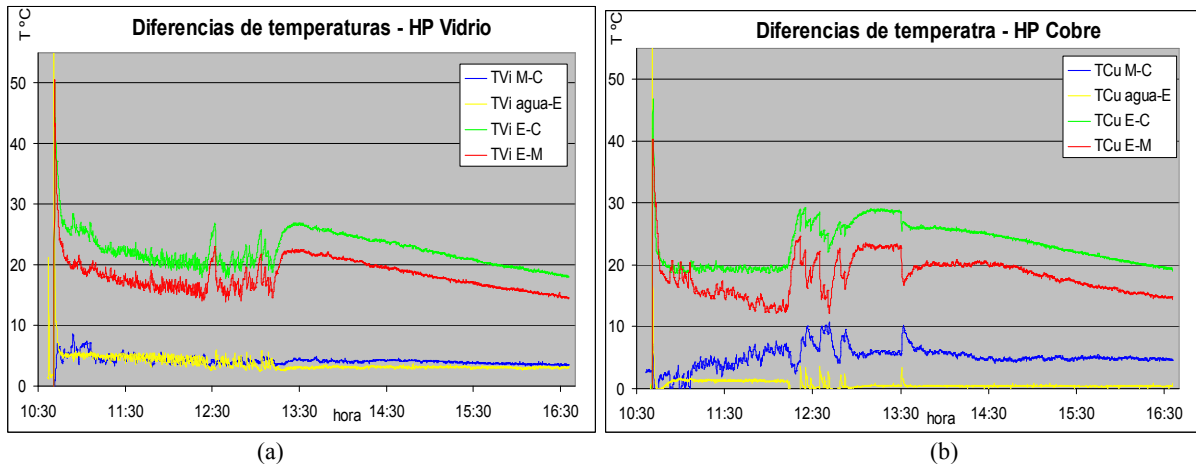


Figura 6. Diferencias de temperaturas medidas en a): el HP de vidrio y b): el HP de cobre, en la serie 2.

Cálculos y análisis de resultados

Se calculó la potencia suministrada por el agua en cada caso así como el coeficiente global de transferencia térmica UA y la resistencia térmica asociada R, empleando las siguientes expresiones.

$$\text{Potencia suministrada:} \quad Q = m \cdot c_p \cdot (T_{\text{agua}}(t_i) - T_{\text{agua}}(t_{i-1})) / \Delta t \quad (1)$$

$$\text{Coeficiente global de transferencia térmica:} \quad UA = Q / (T_e - T_c) \quad (2)$$

$$\text{Resistencia térmica:} \quad R = 1 / UA \quad (3)$$

Se analizó en particular el intervalo de transferencia lineal, definido por el instante en que el evaporador alcanza su máxima temperatura y el instante en que la diferencia de temperatura entre el evaporador (E) y el condensador (C) alcanza un mínimo, a partir del cual crece sistemáticamente. El rango lineal tiene una duración entre un 50 y un 64% mayor en el HP de vidrio que en el de cobre. Las propiedades térmicas del agua se evaluaron en la temperatura media correspondiente a este rango.

La figura 7 muestra los valores medios en este intervalo de potencia, UA y R, para el cobre y el vidrio mientras que la figura 8 muestra la energía total transmitida en este rango, correspondientes a las tres series.

En las series 1 y 2, si bien el HP de cobre extrae más potencia que el de vidrio, un 12% más, debido a la mayor duración del rango lineal en este último, la energía transferida por el de vidrio es entre un 32 y un 45% mayor. Cuando los HP están aislados, serie 3, la potencia transmitida por ambos es menor que en las series 1 y 2, y tanto la potencia como la energía total transmitida por el de vidrio es menor que la del cobre.

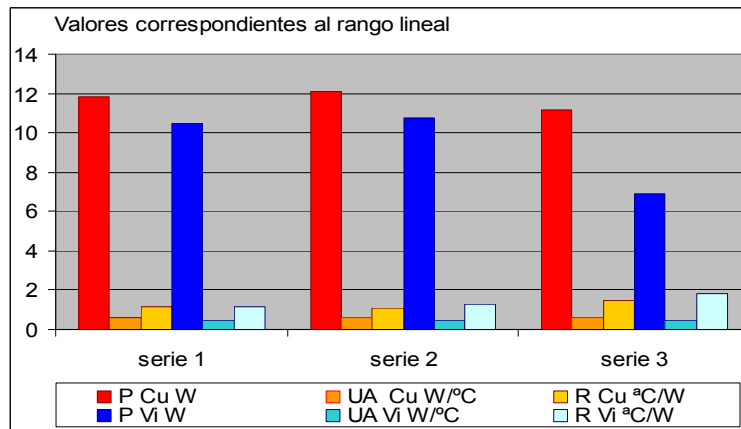


Figura 7. Valores medios de potencia, UA y R, para el cobre y el vidrio en el rango lineal, todas las series.

Es notable en la figura 8 que la energía extraída por el cobre cuando está aislado es mayor que cuando no lo está, un 38% mayor, pese a que la longitud del condensador disminuyó un 19% y la potencia con que actúa disminuyó en un 7%. Esta aparente contradicción se resuelve cuando se analiza la duración del rango lineal: cuando los HP están aislados, la duración del rango lineal se incrementa en el cobre un 48% mientras que en el vidrio sólo aumentó un 12%. Al aumentar este rango, aumenta el tiempo durante el cuál el HP actúa de manera pulsante, lo que incrementa notablemente la energía extraída del termo.

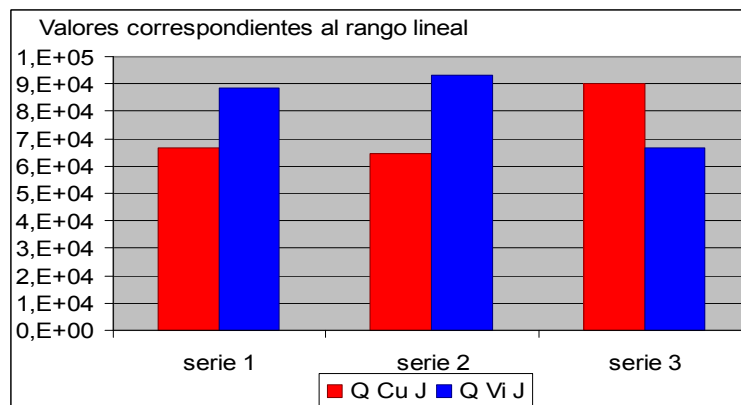


Figura 8. Energía total transferida por el agua en el rango lineal, todas las series.

Si se grafica la potencia instantánea transferida por el agua en función del tiempo, muestra fuertes oscilaciones, tomando incluso valores negativos, que a priori, parecerían carecer de sentido. Sin embargo, si se calculan los promedios por minuto y se grafican en función del tiempo, se obtienen resultados positivos, con tendencia decreciente. Esto sugiere que la gran inercia térmica del agua no permite que la termocupla que mide su temperatura, ubicada a 4 cm del HP, responda rápidamente a los cambios de temperatura que se producen en el evaporador cuando la frecuencia de muestreo es muy alta.

El gráfico del coeficiente global de transferencia térmica UA en función de la potencia suministrada (figura 9 a y b) muestra una tendencia lineal tanto para el cobre como para el vidrio, de acuerdo a lo que reporta la bibliografía (Anwarul Hasan et al., 2003, Joudi, y Witwit, 2000), con una pendiente ligeramente menor para el vidrio. Este comportamiento se observa también en la serie 3.

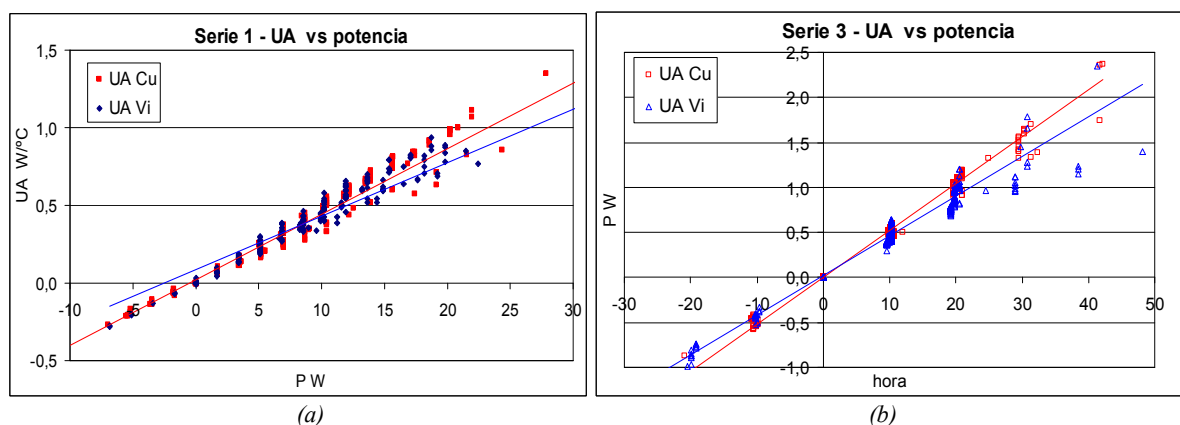


Figura 9. UA en función de la potencia suministrada a los HP de vidrio y cobre, a): serie 1 y b): serie 3.

El gráfico de la resistencia térmica en función de la potencia (figura 10 a y b) muestra una tendencia que se puede ajustar con buena precisión con una curva de tipo potencial $R = aP^b$, de acuerdo a lo que reporta la bibliografía. Los parámetros de ajuste a y b se encuentran en el rango (12 a 27) °C/W y (-0,75 a -1,03) respectivamente.

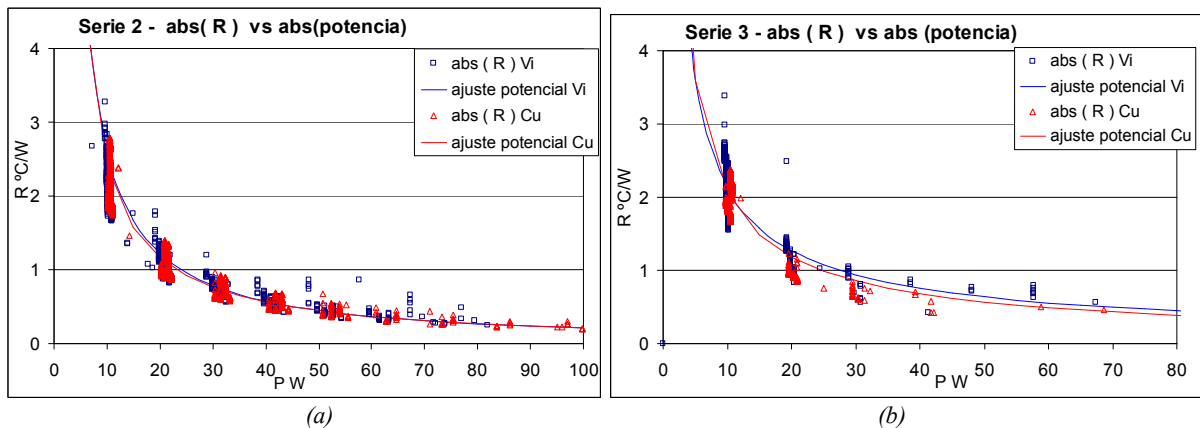


Figura 10. R en función de la potencia suministrada a los HP de vidrio y cobre, a): serie 2 y b): serie 3.

CONCLUSIONES

De las experiencias realizadas se puede concluir lo siguiente.

Las medidas de temperatura muestran oscilaciones tanto en el de vidrio como en el de cobre, asociadas a las pulsaciones causadas por las burbujas observadas en el de vidrio, por lo que se puede concluir que el de cobre también pulsa.

Este comportamiento se mantiene por periodos más cortos en el HP de cobre que en el de vidrio.

En las mismas medidas se observan rangos característicos de funcionamiento asociados posiblemente a distintos comportamientos termo-hidrodinámicos en el fluido de intercambio.

Cuando los HP no están aislados, en el rango lineal el de cobre extrae más potencia que el de vidrio. Como el rango lineal es más largo en el de vidrio, éste transfiere más energía en este periodo que el de cobre.

Cuando los HP están aislados, la potencia transmitida por ambos es menor que cuando no lo están, y tanto la potencia como la energía total transmitida por el de vidrio es menor que las del cobre.

Cuando están aislados aumenta la duración de la etapa lineal (pulsante) respecto de las observadas sin aislación, más en el cobre que en el vidrio. Por esto, a pesar de que la potencia con que actúa es menor, el HP de cobre extrae más energía que cuando no está aislado.

Se concluye que la transferencia de energía será mayor cuanto más dure la etapa pulsante de funcionamiento de un HP. Estas características no se pueden deducir de las teorías actuales sobre funcionamiento de los HP asistidos por la gravedad, lo que implica que se deben revisar las teorías tradicionales en uso.

El coeficiente global de transferencia UA en función de la potencia extraída muestra un comportamiento lineal en el rango de potencias ensayado, mientras que la resistencia térmica R tiene un comportamiento potencial, ambos de acuerdo a lo que se reporta en las referencias.

REFERENCIAS

- Anwarul Hasan, MD, Feroz, Ch, Sadrul Islam, AKM., (2003). *Performance of a gravity assisted heat pipe*, Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering 2003, Bangladesh.
- Charoensawan, P., Khandekar, S., Groll, M., Terdtoon, P. (2003). *Closed loop pulsating heat pipes Part A: parametrical experimental investigations*, Applied Thermal Engineering. **23**, 16, 2009-2020.
- Chi, S.W. (1976). *Heat Pipe Theory and Practice – A source book* McGraw-Hill Book Company.
- De Paul, I., Frigerio, E., Hoyos, D., Quintana, J. (2009). *Visualización de flujos en un tubo de calor asistido por la gravedad*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. **Vol. 13**, versión CD, pp.03.09-03.15. ISSN. 0329-5184
- Dunn, P.D., Reay, D.A. (1976). *Heat Pipes*, Pergamon Press.
- Frigerio, E., De Paul, I., Quintana J. (2009). *Ensayo de un tubo de calor asistido por la gravedad*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. **Vol. 13**, versión CD, pp.03.01-03.07. ISSN. 0329-5184.

- Frigerio, E. (2001) *La radiación nocturna como fuente fría: su caracterización y uso*. Trabajo de Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta.
- Ivanovskiy, M.N., (1982). *The Physical Principles of Heat Pipes*, Clarendon Press, Oxford.
- Joudi, K.A., Witwit, A.M., (2000). *Improvements of gravity assisted wickless heat pipes*, Energy Conversion and Management, **41**, 2041-2061.
- Khandekar, S., Charoensawan, P., Groll, M., Terdtoon, P. (b) (2003). *Closed loop pulsating heat pipes Part B: visualization and semiempirical modelling*, Applied Thermal Engineering, **23**, 16, 2021-2033.
- Khandekar, S., Dollinger, N., Groll, M., (a) (2003). *Understanding operational regimes of closed loop pulsating heat pipes: an experimental study*, Applied Thermal Engineering, **23**, 707-719.
- Khandekar, Sameer, (2004). *Thermo-Hydrodynamics Of Closed Loop Pulsating Heat Pipes*, Tesis de Doctorado, Institut für Kernenergetik und Energiesysteme der Universität Stuttgart.
- Liao, Q., Jen, T.Ch., Chen, Q., L, L., Cui, W., (2007). *Heat transfer performance in 3D internally finned heat pipe*, Int. J. Heat and Mass Transfer, **50**, 1231-1237.
- Shafii, M.B., Faghri, A., Zhang, Y., (2002). *Analysis of heat transfer in unlooped and looped pulsating heat pipes*, Int. J. of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, **12**, 5, 585-609.

ABSTRACT

The performance of gravity assisted heat pipes made in copper and glass was compared under the same thermal conditions and using distillate water as transference fluid. Experiences were performed measuring temperatures; the films and photographs taken showed the pulsating behaviour of the glass HP. The comparison of thermal measurements showed that the copper HP also pulsate, transferring energy as vapour latent heat and sensible heat of strongly displaced volumes of water up. The thermal resistance and global transfer coefficient were calculated for the different powers supplied to the evaporator. The results obtained showed that the conventional accepted theory to describe the functioning of heat pipes does not contemplate this behaviour and it must be checked.

Keywords: thermodynamics, gravity assisted heat pipe, energy transference.