

CARACTERIZACIÓN DE UN GHP PULSANTE

I. De Paul, E. Frigerio

Universidad Nacional de Salta - Av. Bolivia 5150 - 4400 Salta
TE: 387-255424 - E-mail: frigerio@unsa.edu.ar

Recibido: 02/08/12; Aceptado: 02/10/12

RESUMEN: Se ensayó un tubo de calor asistido por la gravedad (GHP) hecho en cobre en condiciones de calentamiento estacionario que emplea agua destilada como fluido de transferencia. Las medidas térmicas muestran un funcionamiento pulsante consistente con observaciones previas que evidencian distintos regímenes de funcionamiento termohidrodinámico. Los modos de ebullición presentes corresponden a un régimen de ebullición por nucleación con la formación de columnas de burbujas y al régimen de transición hacia la formación de una película. El flujo de calor crítico q''_{max} es $1,4 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ aproximadamente. Se calculó la resistencia térmica y el coeficiente global de transferencia para las distintas potencias ensayadas y se las comparó con resultados previos obteniéndose una buena correlación para Q en el rango 5W a 75W.

Palabras clave: tubo de calor asistido por la gravedad, transferencia de energía, ebullición geiser.

INTRODUCCIÓN

Los tubos de calor (heat pipes en inglés, HP) son dispositivos que transfieren rápidamente calor de un lugar a otro. Su uso se está extendiendo a distintas áreas de la tecnología con el objetivo de disipar calor en gran cantidad y en forma eficiente desde alguna fuente. (Khandekar, 2004, Shafii y otros, 2002, Khandekar y otros, 2003, Charoensawan y otros 2003, Tang y otros, 2010, Yang y otros 2009, Dobson y Ruppertsberg, 2007, Ruppertsberg y Dobson, 2007)

Su forma más conocida es la de un tubo cerrado en ambos extremos, al cuál se le ha practicado el vacío y se le ha introducido un fluido de trabajo adecuado a la temperatura a la cuál debe operar. Este fluido se encuentra en equilibrio entre sus fases vapor y líquida. Se distinguen tres secciones: la evaporadora donde el aparato absorbe calor y evapora el líquido, la condensadora donde entrega calor a otro medio y el vapor se condensa y la intermedia entre ambas que se conoce con el nombre de sección adiabática que sirve de pasaje del fluido en ambas direcciones (Chi, 1976, Dunn y Reay 1976, Ivanovskyii, 1982). Cuando estos dispositivos se utilizan en forma vertical, el regreso del líquido de trabajo condensado se realiza por gravedad y por ello a estos tubos que se comportan como un termosifón se los denomina tubos de calor asistidos por la gravedad (GHP gravity assisted heat pipes) (Anwarul Hasan y otros, 2003, Joudi y Witwit, 2000, Filippeschi, 2009).

Para conocer mejor las características de su funcionamiento se comenzó a estudiar estos dispositivos para lo cuál se construyó un HP en vidrio para poder visualizar el flujo en su interior. Las experiencias realizadas mostraron que la descripción de su funcionamiento que se hace en la bibliografía (Chi, 1976, Dunn y Reay 1976, Ivanovskyii, 1982) no se ajustaba a lo observado, apareciendo un carácter pulsante en la transferencia (De Paul y otros 2009, Frigerio y otros 2009) asociado a un fenómeno mucho más complejo, el “efecto geiser” reportado en otras publicaciones (Lips, y otros 2010, Khazaeaa, y otros 2010, Lin y otros 1995, Sarmasti Emami, M.R. y otros 2009, Tadrist, L. 2007).

El estudio comparativo del comportamiento termo-fluidodinámico de tubos de calor asistidos por la gravedad de cobre y vidrio que siguió, mostró que ante las mismas condiciones de trabajo ambos tubos tenían un comportamiento pulsante, cada uno con sus características propias lo que podía inferirse a partir de medidas térmicas. Estas experiencias se realizaron en principio suministrando potencia térmica variable, llevando la temperatura del agua de un termo a un valor máximo especificado y analizando el enfriamiento hacia el ambiente producido por los GHP (De Paul y otros 2010, Frigerio y otros 2010). Las siguientes experiencias fueron realizadas a potencia constante y se empleó como fuente de calor un termostato, manteniendo las restantes condiciones iguales. En el presente trabajo se discuten las características de la transferencia de calor en el GHP de cobre sometido a suministro de potencia constante con calentamiento eléctrico y se analizan los resultados obtenidos en todas las experiencias.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

El tubo de calor de cobre ensayado tiene 71cm de longitud total, diámetro externo 1,5cm y diámetro interno 1,3cm. El evaporador mide 15,5cm, la sección adiabática 6,5cm y el condensador mide 49 cm, el líquido de trabajo que se empleó es agua destilada y desgasada con una fracción de llenado del 12% (figura 1.a).

Se empleó como calefactor una barra de aluminio de 20cm de largo y 5cm de diámetro en la que se realizó una perforación de 2,2cm de diámetro donde se colocó el GHP; para mejorar el contacto térmico se agregó glicerina al hueco del calefactor. Sobre la barra se enrolló una resistencia de 18Ω que, conectada a un variac, suministra el calentamiento manteniendo la potencia constante que se desea. La barra está colocada en un soporte de PVC envuelta en 5 cm de lana mineral aislante que

asegura que la fracción que calor que escapa al exterior es despreciable (figura 1.b). Se midió el voltaje y la corriente suministrados para calcular la potencia empleando multímetros digitales.

Con termocuplas se midieron las temperaturas en el extremo inferior que corresponde al evaporador (T_{evap}), al superior que corresponde al condensador (T_{cond}), en el punto medio (T_{medio}) del tubo, en la superficie interna del calefactor (T_{cal}) y la temperatura ambiente (T_{amb}), empleando un sistema de adquisición de datos Omega DaqPro 5300, con intervalos de medida de 1 minuto y de 10 segundos.

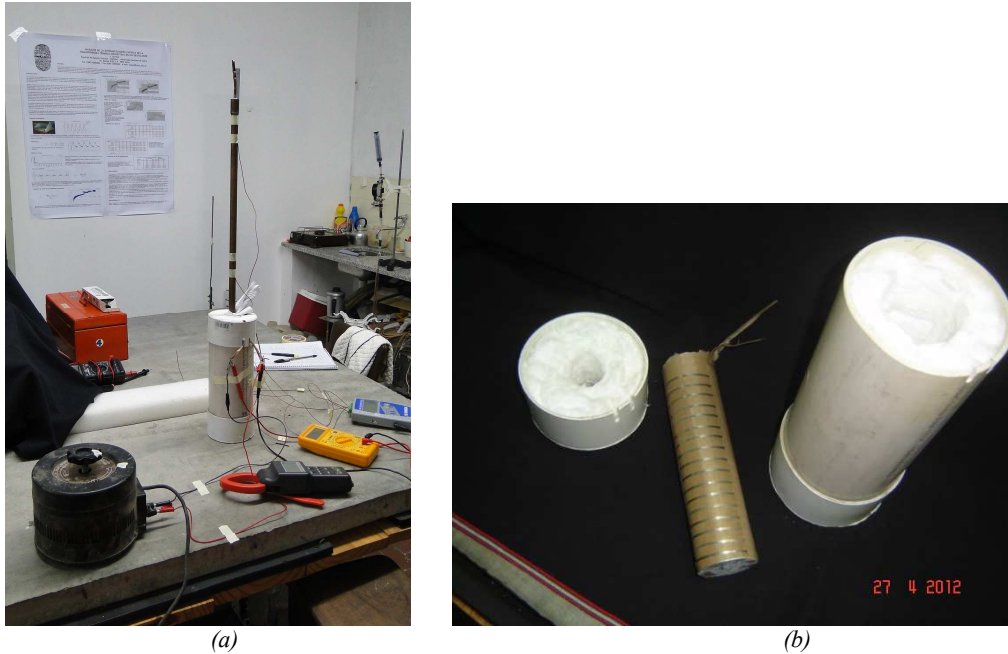


Figura 1. Fotos de la experiencia armada con el tubo de cobre y del calefactor empleado.

ENSAYOS REALIZADOS

Dado que menos del 0.3% de la potencia suministrada se pierde hacia el exterior en el calefactor se consideró que toda la potencia eléctrica se emplea en calentar el cilindro; este calor es transmitido al GHP que lo evacúa hacia el ambiente.

Se realizaron experiencias variando la potencia suministrada entre 5,9W y 41,7W evacuando el calor hacia el ambiente por convección natural, en condiciones en que la temperatura del laboratorio fue prácticamente constante, alrededor de los 15°C. Siguiendo la bibliografía se calcularon el coeficiente global de transferencia térmica UA y la resistencia térmica R del GHP con las siguientes expresiones.

$$\text{Potencia térmica suministrada:} \quad Q = VI \quad (1)$$

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

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

RESULTADOS DE LAS MEDIDAS Y ANÁLISIS

Las figuras 2.a) muestran las temperaturas medidas en tres experiencias correspondientes a tres valores de Q en el rango ensayado: 9,8W, 21,1W y 41,7W, en las que la temperatura máxima alcanzada en el evaporador fue de 57.6°C, 71.7°C y 99.4°C respectivamente. Las figuras 2.b) muestran a las diferencias de temperaturas entre el calefactor y los tres puntos medidos en el GHP, así como las diferencias entre el evaporador y el medio, el medio y el condensador y entre el evaporador y el condensador.

En ambos conjuntos de gráficos se distinguen diferentes regímenes de funcionamiento del GHP y cómo éstos cambian a medida que aumenta la potencia suministrada.

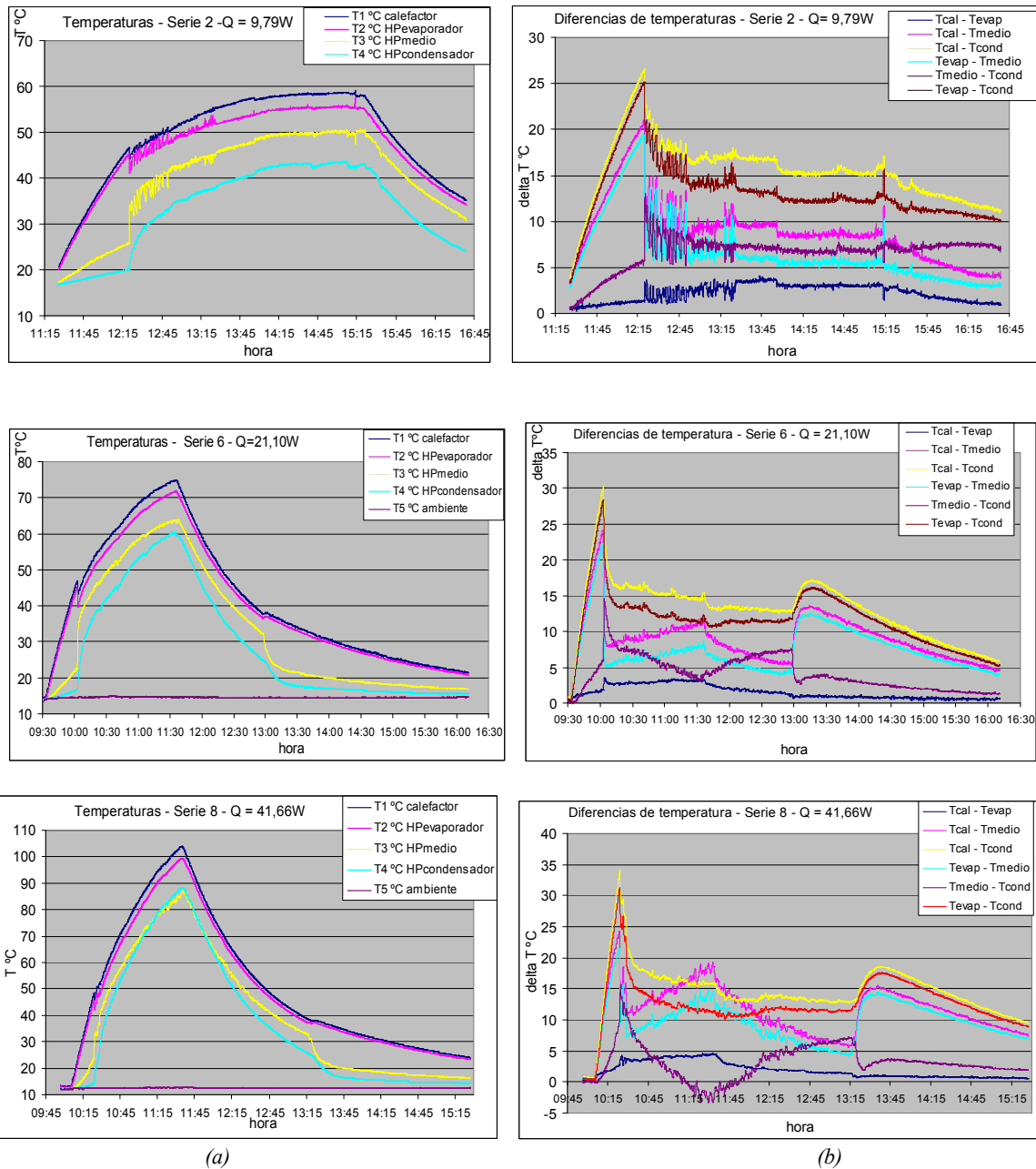


Figura 2. a) Temperaturas y b) diferencias de temperaturas medidas en el HP de cobre para potencias térmicas $Q = 9,79$, $21,1W$ y $41,66W$ respectivamente.

Hay un transitorio inicial en el que todas las temperaturas aumentan regularmente durante el cual el calor se transmite por conducción en las paredes de cobre y por evaporación del agua en el interior del GHP de acuerdo a la descripción tradicional. A continuación T_{cal} y T_{evap} sufren un brusco descenso mientras que T_{medio} y T_{cond} aumentan bruscamente y aparecen fuertes oscilaciones indicando la aparición de un régimen pulsante. De acuerdo a lo observado en experiencias anteriores en un GHP de vidrio (De Paul y otros 2009) esto corresponde a la aparición de burbujas que son expulsadas con fuerza hacia arriba. Algunas se rompen produciendo un pulso de vapor ascendente; otras empujan una cierta cantidad de agua líquida (tapón) que a medida que asciende va disminuyendo el volumen de líquido por adherencia sobre las paredes del tubo. Cuando alcanzan el extremo superior lo hacen con fuerza, se escucha un ruido característico como un disparo y a continuación el agua condensada desciende a lo largo de las paredes (“efecto geiser” figura 3) (Sarmasti Emami, y otros, 2009). En el GHP de cobre, si bien no se puede ver qué ocurre, sí se puede escuchar el ruido.

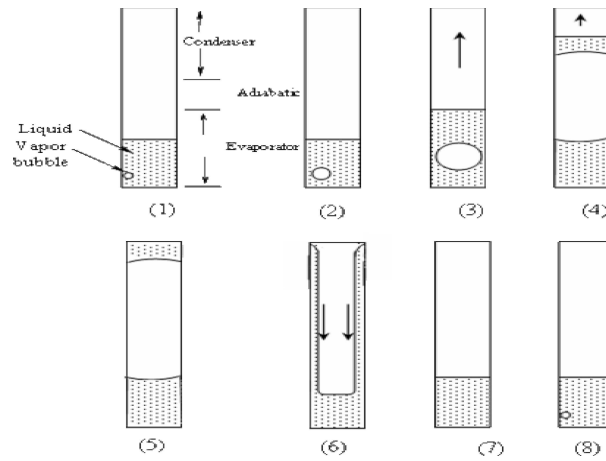


Figura 3. Esquema del efecto geiser, Ref: Sarmasti Emami 2009.

La amplitud de las pulsaciones disminuye a medida que aumenta la potencia Q y se produce una transición a un régimen en el que se observan oscilaciones rápidas de menor amplitud y mayor frecuencia. El análisis de Fourier de las medidas realizadas muestra bajas frecuencias dominantes en todo el rango de Q ensayado, y en el rango de altas frecuencias una contribución pareja para Q bajos y una contribución significativa para $Q > 18W$ en el rango de $2,9 \times 10^{-2} Hz$ hasta $4,4 \times 10^{-2} Hz$ aproximadamente. Los periodos asociados a las tres frecuencias bajas dominantes se detallan en la Tabla I, sin que se pueda establecer un patrón de correspondencia con Q a partir de las medidas realizadas.

Tres primeros periodos dominantes a bajas frecuencias			
Q W	p1 min	p2 min	p3 min
5,87	16,0	11,6	8,0
9,79	2,4	1,7	1,4
18,13	113,8	68,3	48,8
21,10	113,8	68,3	48,8
25,80	34,1	24,4	15,5
41,70	42,7	19,0	14,2

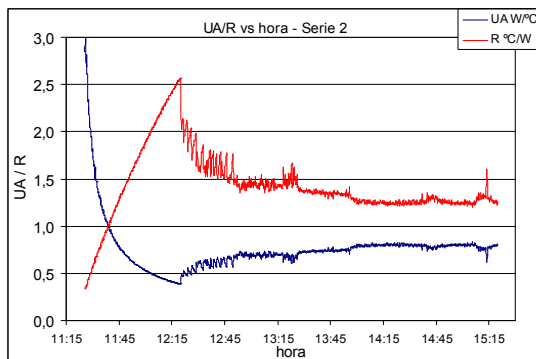
Tabla I

	Q W	UA_{Puls} W/°C	R_{Puls} °C/W
serie 1	5,87	0,37	2,69
serie 2	9,79	0,73	1,39
serie 3	13,24	0,79	1,28
serie 4	13,64	0,79	1,30
serie 5	18,13	1,02	1,00
serie 6	21,10	1,63	0,63
serie 7	25,82	2,08	0,49
serie 8	41,66	3,17	0,33

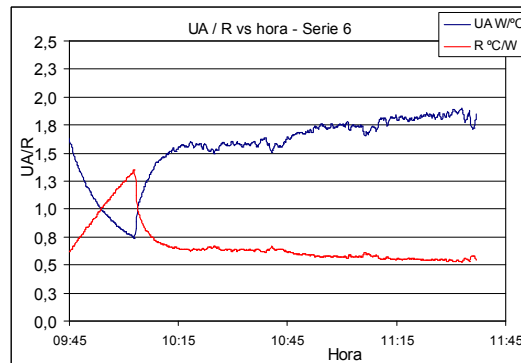
Tabla II

Cuando se corta el calentamiento también se observa una transición en el régimen de enfriamiento. Al comienzo todas las temperaturas descienden regularmente, pero en algún momento se desacoplan T_{medio} y T_{cond} de T_{cal} y T_{evap} ; las primeras se enfrían más rápidamente hacia el ambiente mientras que las últimas sufren un ligero aumento de temperatura para luego continuar enfriándose regularmente. Al comienzo del enfriamiento se observan oscilaciones cuando la potencia suministrada es mayor que 25W.

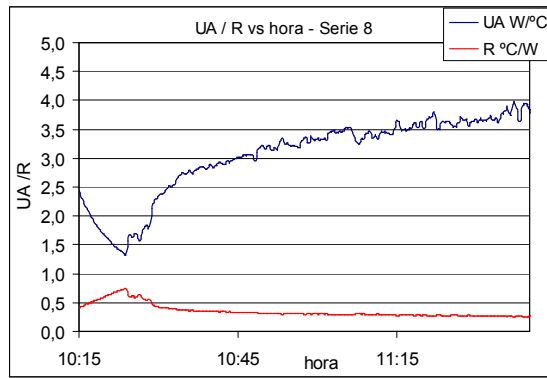
Las figuras 4 a), b) y c) muestran los valores de los coeficientes globales de transferencia UA y la resistencia R calculados en función de la hora, que muestran un comportamiento oscilante concordante con $T_{evap} - T_{cond}$. Correspondientes a las series 2, 6 y 8. Para potencias menores que 25W los valores se estabilizan alrededor de un valor medio que depende de Q con una dispersión comprendida entre 3,5% y 6,5%; a potencias mayores UA crece sistemáticamente mientras dura el calentamiento.



(a)



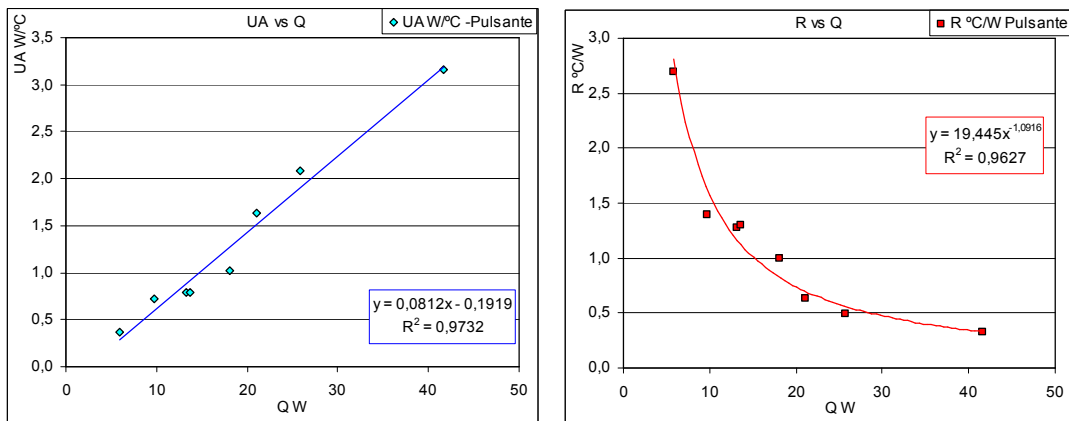
(b)



(c)

Figura 4. Valores instantáneos de UA y R en función del tiempo

Las figuras 5 a) y b) y la Tabla II muestran los valores promedio de los coeficientes globales de transferencia UA y la resistencia R en función de la potencia disipada por los tubos Q, en régimen pulsante. Se observa que UA para ambos regímenes presenta una tendencia lineal creciente, mientras que R muestra una tendencia decreciente siguiendo un ajuste potencial como se observó en experiencias previas y de acuerdo a lo que reporta la bibliografía.

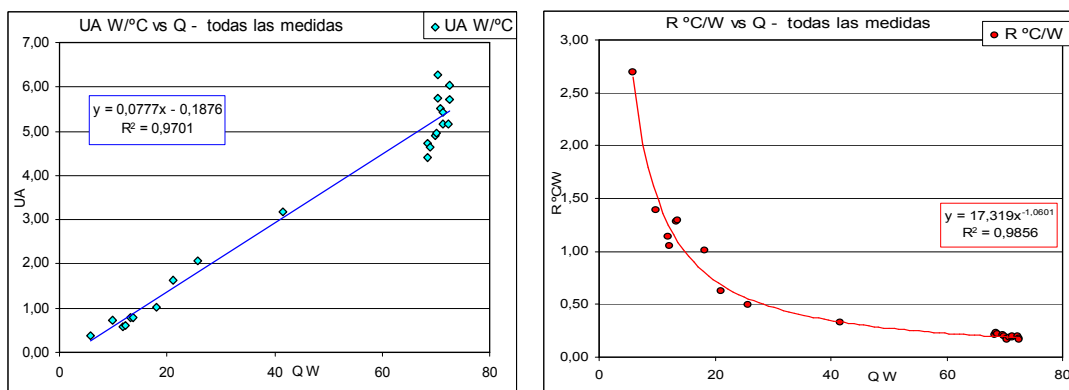


(a)

(b)

Figura 5. Valores medios de (a) UA y (b) R en función de Q, experiencias 2012.

Si se incluyen en los gráficos los valores obtenidos anteriormente en experiencias realizadas con otros calefactores y en un rango de potencias suministradas mayor, se obtiene una muy buena correspondencia con los valores actuales en el sentido que los ajustes muestran un alto coeficiente de determinación R^2 (figura 6 a) y b)).



(a)

(b)

Figura 6. Valores medios de (a) UA y (b) R en función de Q, incluye experiencias previas.

La consistencia de las medidas realizadas permite establecer que en el rango de potencias térmicas $5W < Q < 75W$ se puede caracterizar el GHP de cobre con las siguientes relaciones para el coeficiente global de transferencia térmica y su resistencia térmica:

$$UA = 0,0777Q - 0,1876 \text{ [W/°C]} \quad \text{con } R^2 = 0,97 \quad (4)$$

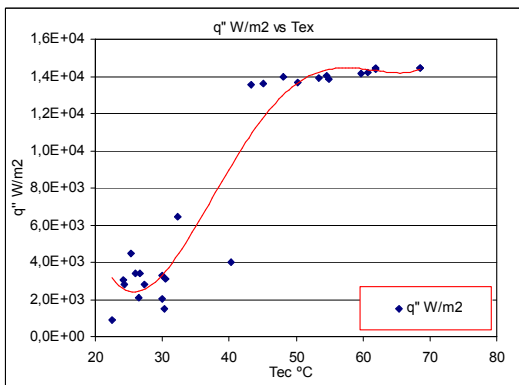
$$R = 17,319Q^{-1,0601} \text{ [°C/W]} \quad \text{con } R^2 = 0,985 \quad (5)$$

MODOS DE EBULLICIÓN

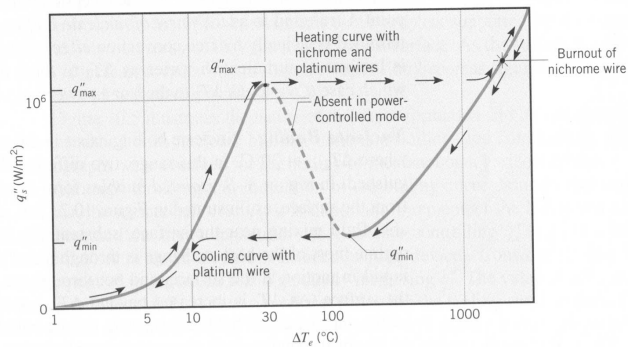
A los efectos de conocer las características de los distintos regímenes de funcionamiento se tomó como referencia el trabajo de Nukiyama que presenta gráficamente el flujo de calor q'' en función del exceso de temperatura T_{ex} , definido como la temperatura de la superficie caliente menos la temperatura de saturación, para agua a presión atmosférica (“pool boiling”), (Incropera, De Witt 1996). La comparación es sólo parcial dado que las experiencias con las que se generó la curva no son las mismas que las actuales, pero sirven como indicativo de las características del flujo en el interior del GHP.

Definiendo: $q'' = Q / \text{área interna del evaporador} \quad [W/m^2] \quad (6)$
 $T_{ex} = T_{evap} - T_{saturación} \quad (7)$

Obtenemos el siguiente gráfico (fig 7.a) que muestra una tendencia similar a la de Nukiyama (figuras 7.b) y 8.a)). De acuerdo a este diagrama en el rango de potencias disipadas el modo de ebullición corresponde a un régimen de ebullición por nucleación con la formación de columnas de burbujas y al régimen de transición hacia la formación de una película. Esta conclusión parece coincidir con lo observado en la ebullición en tubos bajo flujo forzado, en el que en la transición se forma una película líquida sobre las paredes del tubo mientras el vapor asciende por el núcleo (figura 8.b)). El flujo de calor crítico q''_{max} se ubica alrededor de lo $1,4 \times 10^4 W/m^2$.

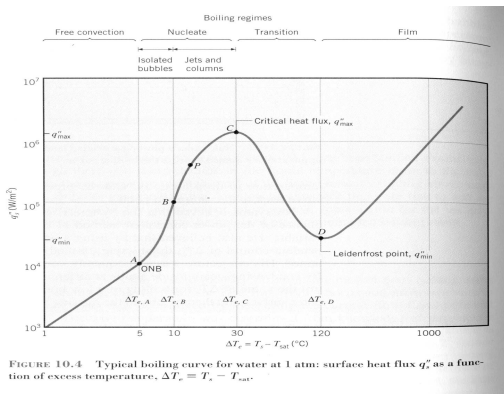


(a)

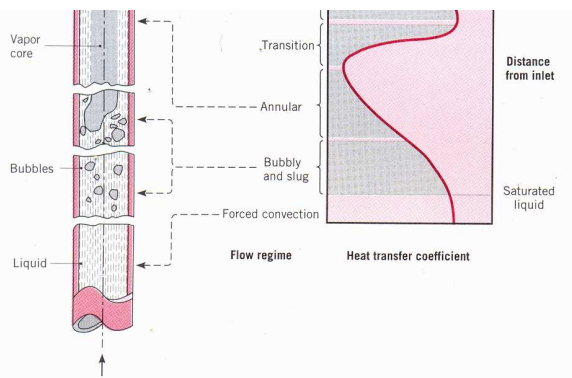


(b)

Figura 7. a) Flujo de calor en función del exceso de temperatura, experiencias actuales. b) diagrama de Nukiyama.



(a)



(b)

Figura 8. a) Diagrama de Nukiyama indicando modos de ebullición en “pool Bowling”. b) Modos de ebullición en flujo forzado en un tubo.

CONCLUSIONES

De las experiencias realizadas con el GHP de cobre, en condiciones de suministro de potencia térmica constante se puede concluir lo siguiente.

Las medidas de temperatura muestran oscilaciones, asociadas a las pulsaciones causadas por el desplazamiento de agua líquida o vapor que confirman resultados previos.

Se distinguen diferentes regímenes de funcionamiento del GHP: un transitorio inicial en el que todas las temperaturas aumentan regularmente; una transición en la que T_{cal} y T_{evap} sufren un brusco descenso mientras que T_{medio} y T_{cond} aumentan bruscamente y el surgimiento pulsante con fuertes oscilaciones en las temperaturas. Durante el enfriamiento hay una transición en el que se desacoplan T_{medio} y T_{cond} de T_{cal} y T_{evap} . Al comienzo del enfriamiento se observan oscilaciones cuando la potencia suministrada es mayor que 25W. La amplitud de las pulsaciones disminuye a medida que aumenta la potencia Q y se produce una transición a un régimen en el que se observan rápidas oscilaciones de alta frecuencia.

Las bajas frecuencias son dominantes en todo el rango de Q ensayado cuyos periodos de pulsación se ubican entre 1,42 min y 113,8 min. A altas frecuencias, en el rango de $2,9 \times 10^{-2}$ Hz hasta $4,4 \times 10^{-2}$ Hz aproximadamente, hay una contribución significativa para $Q > 18$ W.

Incluyendo medidas previas realizadas en un rango de potencias más amplio se puede caracterizar el GHP de cobre con las siguientes relaciones para el coeficiente global de transferencia térmica y su resistencia térmica en el rango de potencias térmicas $5 \text{ W} < Q < 75 \text{ W}$:

$$UA = 0,0777Q - 0,1876 \text{ [W/}^\circ\text{C]} \quad \text{con } R^2 = 0,97$$

$$R = 17,319Q^{1,0601} \text{ [}^\circ\text{C/W]} \quad \text{con } R^2 = 0,985$$

La comparación con el diagrama de Nukiyama sugiere que los modos de ebullición presentes corresponden a un régimen de ebullición por nucleación con la formación de columnas de burbujas y al régimen de transición hacia la formación de una película. El flujo de calor crítico q''_{max} se ubica alrededor de $1,4 \times 10^4 \text{ W/m}^2$.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- MD Anwarul Hasan, Chowdhury MD Feroz, Sadrul Islam, A.K.M. (2003) *Performance of gravity assisted heat pipe* Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering 2003, Dhaka, 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
- De Paul, I. Frigerio, E. Quintana J. (2010). *Explorando el comportamiento caótico en tubos de calor asistidos por la gravedad*. **Vol. 14**, versión CD, pp.03.191-03.197. ISSN. 0329-5184.
- Dobson, R.T., Ruppertsberg, J.C., *Flow and heat transfer I a closed loop thermosyphon. Part I – theoretical simulation*. Journal of Energy in Southern Africa, Vol 18, N° 3, 32-40. (2007)
- Dunn, P.D., Reay, D.A. (1976). *Heat Pipes*, Pergamon Press.
- Filippeschi, S., *On periodic two-phase thermosyphons operating against gravity*, In. Journal of Thermal Science, 45, 124-137 (2009).
- Frigerio, E. De Paul, I. Quintana J. *Estudio comparativo del funcionamiento de tubos de calor en cobre y vidrio* **Vol. 14**, versión CD, pp.03.177-03.183. (2010). ISSN. 0329-5184.
- 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.
- Incropera, F.P., De Witt, D.P. (1996) *Introduction to heat transfer 3rd. Ed.* John Wiley & Sons.
- 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., Dollinger, N., Groll, M., (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.
- Khazaei, I., Hosseinib, R., Noie, S.H. (2010) *Experimental investigation of effective parameters and correlation of geyser boiling in a two phase closed thermosyphon*, Applied Thermal Engineering 30 (5) 406-412.
- Lin, T.F., Lin, W.T., Tsay, Y.L., Wu, J.C. (1995) *Experimental investigation of geyser boiling in an annular two-phase closed thermosyphon*, Int. J. Of Heat and Mass Transfer, 38 (2) 295-307.
- Lips, S., Bensalem, A., Bertin, Y., Ayel, V., Romestant, C. (2010) *Experimental evidences of distinct heat transfer regimes in pulsating heat pipes (PHP)* Applied Thermal Engineering 30, 900-907
- Ruppertsberg, J.C., Dobson, R.T., *Flow and heat transfer in a closed loop thermosyphon. Part II – experimental simulation*. Journal of Energy in Southern Africa, Vol 18, N° 3, 41-48. (2007)
- Sarmasti Emami, M.R., Noie, S.H., Khooshnoodi, M.K., Hamed Mosavian, M.T., Kianifar, A. (2009) *Investigation of geyser boiling phenomenon in a two-phase closed thermosyphon* Heat Transfer Engineering, 30(5), 408-415.
- 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.
- Tadrist, L. (2007). *Review on two-phase flow instabilities in narrow spaces*, International Journal of Heat and Fluid Flow, 28, 54-62.

Tang, X., Quan, Z., Zhao, Y. *Experimental investigation of solar panel cooling by a novel micro heat pipe array*, Energy and Power Engineering, 2010, 2, 171-174
Yang, H., Khandekar, S., Groll, M., *Performance characteristics of pulsating heat pipes as integral thermal spreaders*, Int. Journal of Thermal Science, 48, 815-824. (2009)

ABSTRACT

A gravity assisted heat pipe (GHP) made in copper with distillate water as transference fluid was tested under conditions of stationary warming. Thermal measurements show a pulsating functioning consistent with previous results, putting in evidence different thermohydrodynamic regimes of functioning. The boiling regimes observed are consistent with nucleate boiling with bubbles columns and with a transition regime to a film boiling. The critical heat flux is $1,4 \times 10^4 \text{W/m}^2$ approximately. The thermal resistance and the global transfer coefficient were calculated for the different tested powers and they were compared with previous results; a good correlation was obtained for Q in the range 5W to 75W.

Keywords: gravity assisted heat pipe, energy transference, geyser boiling