



EXPLORANDO EL COMPORTAMIENTO CAÓTICO EN TUBOS DE CALOR ASISTIDOS POR LA GRAVEDAD

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

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

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

RESUMEN: Se analizaron las series temporales de las medidas realizadas en tubos de calor asistidos por la gravedad, contruidos en cobre y vidrio, con el fin de detectar la presencia de fenómenos caóticos en su funcionamiento y, de ser así, la influencia que pueda tener en la energía extraída de la fuente caliente. La visualización de flujos realizada en el tubo de calor de vidrio fue una herramienta importante en este estudio que facilitó el análisis de las series temporales medidas. En el presente trabajo se analizaron sólo dos indicadores de la presencia de caos: el espectro de Fourier y los exponentes de Lyapunov. Los resultados muestran que bajo ciertas condiciones tanto el tubo de calor de cobre como el de vidrio muestran comportamiento caótico, más en el de vidrio que en el de cobre, con una influencia notable de la alta conductividad del cobre.

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

INTRODUCCIÓN

Los tubos de calor (heat pipes, HP) son sistemas que transfieren energía térmica con gran eficiencia que consisten fundamentalmente en un tubo cerrado en el que se hizo vacío y al que posteriormente se lo llenó con un líquido que queda en equilibrio con su vapor a baja presión. El líquido absorbe calor en un extremo y se evapora (sección evaporadora); el calor latente del vapor es transportado por convección al otro extremo donde se condensa (sección condensadora) entregando calor. Para operar en cualquier orientación, tienen una mecha o malla que permite el retorno del líquido condensado hacia el evaporador, por capilaridad. (Chi, 1976, Dunn y Reay, 1976, Ivanovskyii, 1982, Khandekar, 2004, Liao et al., 2007). 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", GAHP). (Joudi y Witwit, 2000; Anwarul Hasan et al., 2003; Filippeschi, 2009).

Entre los muchos campos de aplicación de estos dispositivos la electrónica es uno de los más importantes, en el cuál se aplican los llamados "tubos de calor pulsantes de ciclo cerrado" ("closed loop pulsating heat pipes, CLPHPs") que consisten en tubos capilares, cerrados, dispuestos como una especie de bobinado en los que el calor es transmitido no sólo en forma de calor latente sino también como calor sensible del fluido que se desplaza de manera pulsante. (Khandekar, 2004, Shafii et al., 2002, Khandekar et al. (a), 2003, Charoensawan et al., 2003, Khandekar et al. (b) 2003; Yang et al., 2009; Shafii et al., 2002). Estos dispositivos están siendo estudiados porque presentan un comportamiento caótico que permite eventualmente intensificar la transferencia térmica y mejorar así la eficiencia de diseño (Qu et al., 2009; Song y Xu, 2009).

Este efecto de intensificación de la transferencia térmica originada en el comportamiento caótico en destiladores fue descubierto y estudiado en experiencias realizadas en la Universidad de Salta (De Paul et al., 2006; De Paul, I. 2007; De Paul et al., 2007; De Paul, 2009) Se propuso entonces, a partir de la experiencia adquirida, estudiar el comportamiento termofluidodinámico de tubos de calor asistidos por la gravedad con el fin de determinar si ellos también presentan comportamiento caótico, y bajo qué condiciones esto ocurriría, con el fin de tener control de la transferencia térmica. No se encontró en la bibliografía consultada ninguna referencia que hiciera mención a tal comportamiento en GAHPs.

Las primeras experiencias de visualización de flujos realizadas con un HP de vidrio (De Paul et al., 2009; Frigerio et al., 2009) mostraron que presentaba un carácter pulsante, en el que el calor se transmitía no sólo como calor latente de vaporización, sino como calor sensible de volúmenes de agua desplazados rápidamente hacia arriba debido a la formación de burbujas de vapor en el evaporador. En otro trabajo presentado en esta reunión (Frigerio et al., 2010) se presentan resultados que muestran, a partir del análisis de registros de temperatura, que este carácter pulsante también está presente en tubos de cobre en los que la visualización no es posible. Se concluye que el carácter pulsante es intrínseco al funcionamiento de los GAHPs y, como la teoría convencionalmente empleada no contempla este comportamiento, es necesario revisar la teoría y alcanzar un conocimiento más profundo de la física subyacente en el comportamiento de estos dispositivos.

Bajo este punto de vista, es importante conocer si los GAHPs presentan comportamiento caótico y, de ser así, qué influencia tiene en la transferencia térmica de los tubos de calor. En el presente trabajo, y a partir de los ensayos descritos en Frigerio et al., 2010, se analizan las medidas realizadas desde la perspectiva del reconocimiento experimental del caos, a partir de las técnicas aplicables a estos casos.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Se emplearon dos tubos de calor, uno de vidrio de 0.66 m y uno de cobre de 0.75 m de largo, como se describe en (Frigerio et al., 2010). Se empleó como fuente de calor agua termostatazada colocada en termos iguales asegurando que las condiciones iniciales de funcionamiento de ambos tubos fueran las mismas. Se midieron las temperaturas en el evaporador (E), el condensador (C), en el punto medio de los tubos (M), en el agua a 4 cm de los tubos y en el ambiente, empleando termocuplas T y un sistema de adquisición de datos Omega DaqPro 5300. El intervalo de medida fue de 10s y 1s. En las experiencias realizadas la temperatura inicial del agua se encontró en el rango 70°C a 80°C. La figura 1 muestra la disposición experimental de los tubos de calor ensayados, los termos y termocuplas empleados.

Se realizó visualización de flujos en el de vidrio para poder correlacionar lo observado con las medidas térmicas y comparar éstas con las obtenidas en el HP de cobre. Se filmaron y fotografiaron las experiencias empleando una cámara convencional Sony.



Figura 1. Disposición experimental de los tubos, del termo y las termocuplas de medida.

VISUALIZACIÓN DE FLUJOS

Todas las experiencias realizadas mostraron que el HP de vidrio funcionaba de manera pulsante durante varias horas. Las filmaciones muestran que, igual que lo reportado en (De Paul et al., 2009; Frigerio et al., 2009), un cierto volumen de agua se desplaza rápidamente hacia arriba; ya sea en forma de vapor o agua líquida el impacto sobre el extremo superior del tubo es claramente audible como un disparo. El agua condensada en el extremo superior se desliza luego hacia abajo formando una película que lentamente se va rompiendo.

Al fotografiar las experiencias en modo multirráfaga con un período de 1/30 s entre tomas, se pudo observar en algunos casos el avance de un frente de vapor que arrastra pequeñas gotas condensadas debido a la compresión que produce la formación de burbujas en el evaporador, que son expulsadas violentamente hacia arriba debido al aumento brusco de presión. La figura 2 muestra una secuencia de cuatro imágenes con un frente de vapor que avanza en tres posiciones consecutivas, mientras la cuarta muestra la formación de un nuevo frente.

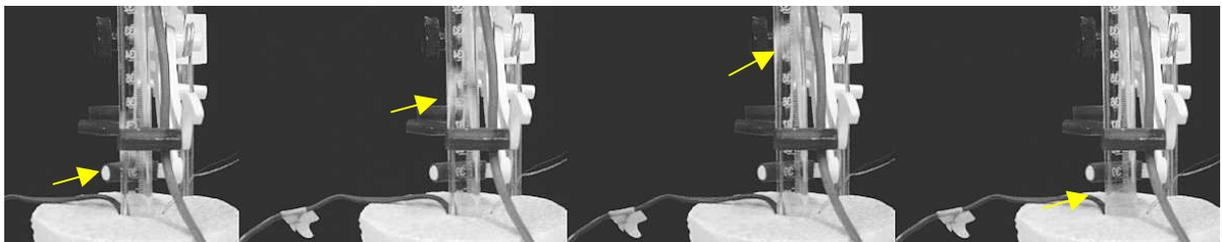


Figura 2. Avance de un frente de vapor en el HP de vidrio.

RECONOCIMIENTO EXPERIMENTAL DEL CAOS

Ya se planteó en (De Paul et al., 2006) que la posibilidad de detectar un comportamiento caótico a partir de resultados experimentales no es simple debido a la complejidad de los sistemas en consideración que, en el caso de la convección, depende no sólo de la naturaleza del fluido en convección sino también de la configuración experimental y en algunos casos

de la historia misma de la experiencia. No existe un único parámetro que caracterice los sistemas caóticos por lo que en el presente trabajo se analizan solamente el espectro de Fourier y los coeficientes de Lyapunov.

Usualmente la aproximación empírica a la identificación del caos consiste en realizar un análisis de las series temporales de la variable medida, cualquiera que ésta sea, designada en forma genérica como $W(t)$ (Manneville, 2004; Boccaletti, et al., 2004). Experimentalmente los datos medidos de un observable cualquiera son muestreados en tiempos discretos $t_k = k\tau$ siendo $1/\tau$ la frecuencia de muestreo por lo que la variable analizada toma valores discretos $W_k = W(t_k)$. El primer paso es la inspección visual de la señal medida que muestra si hay características recurrentes o intermitentes que sugieran un comportamiento caótico. Las periodicidades presentes en una señal se ponen de manifiesto objetivamente por medio del análisis de Fourier.

Los sistemas caóticos presentan una fuerte sensibilidad a las condiciones iniciales. Esto significa que si bien el estado del sistema en un instante particular t_k determina el estado en un instante posterior $t_k + \Delta t$, cualquier fluctuación en las condiciones del mismo es amplificada y al cabo de pocos pasos de tiempo la dinámica del sistema no tiene memoria de las condiciones iniciales. Cuando se analiza la evolución del sistema en el espacio de las fases o de representación, lo que se observa es una divergencia exponencial de las trayectorias cuando las condiciones iniciales cambian, es decir, cuando se generan series temporales desplazadas inicialmente una cierta cantidad qt . Este efecto se pone de manifiesto a partir de los coeficientes de Lyapunov λ que, cuando toma valores positivos, produce una divergencia que conduce a un comportamiento caótico. La bibliografía consultada muestra que convencionalmente se acepta que la sola presencia de un valor positivo de λ indica un comportamiento caótico (Manneville, 2004; Strogatz, 1994).

ANÁLISIS DE FOURIER

Se realizó el análisis de Fourier de las medidas de temperaturas en el evaporador (E), el condensador (C), el punto medio del tubo (M) y el agua contenida en cada uno de los termos. También de las diferencias de temperaturas entre el agua y el evaporador (Tagua- E), entre evaporador y condensador (E-C), entre el evaporador y el punto medio (E-M) y entre el punto medio y el condensador (M-C), cada uno de los cuáles representa una etapa particular de la transferencia térmica. A los fines de ejemplificar los resultados de los cálculos se muestran en las siguientes figuras los correspondientes a una serie particular de medidas.

Se observa que tanto para el vidrio como para el cobre los espectros de Fourier correspondientes a las temperaturas presentan un comportamiento dominado por oscilaciones de baja frecuencia, seguido por un espectro muy apretado de frecuencias altas, a excepción del agua que no muestra oscilaciones, lo que puede originarse en la gran inercia térmica que presenta el agua ante variaciones de temperatura rápidas en el evaporador (figuras 3 a y b). En ambos casos la contribución a la potencia espectral del evaporador es mayor que la del condensador y el medio.

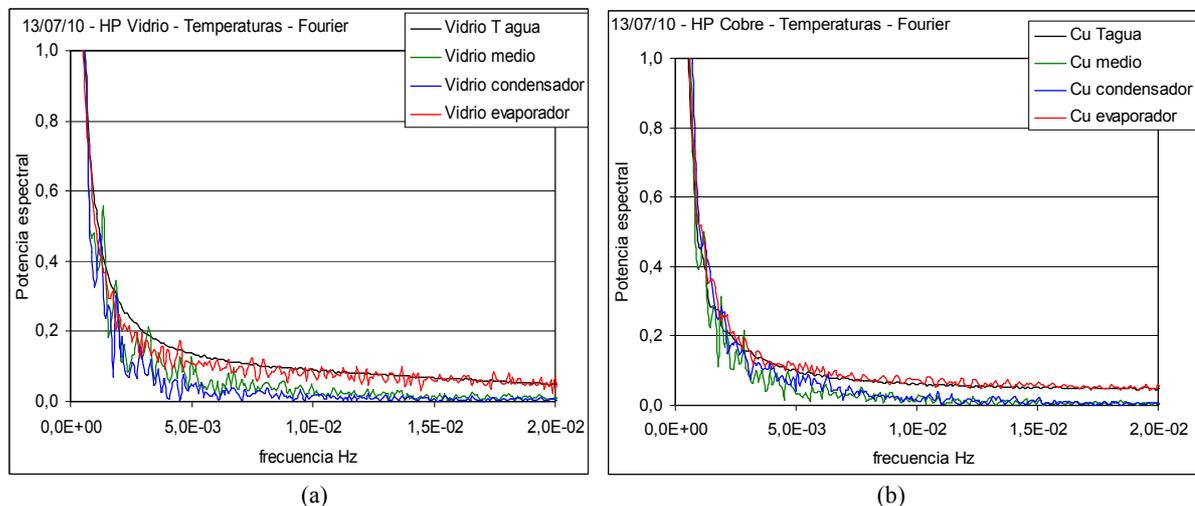


Figura 3. Espectro de Fourier de las temperaturas medidas en a) el HP de vidrio y b) el HP de cobre.

Los espectros de Fourier de las diferencias de temperaturas muestran algunas peculiaridades. Si bien las bajas frecuencias también son dominantes, especialmente en el cobre, su contribución espectral es menor. En ambos casos las contribuciones de E-C y E-M son mayores que la de M-C lo que permite comprobar que lo que ocurre en el evaporador es un factor de mayor importancia que lo que ocurre en el condensador, en el comportamiento global del sistema (figuras 4 a y b).

Las mayores diferencias aparecen cuando se analiza el rango de altas frecuencias. En el caso de las temperaturas se observa que para el vidrio las contribuciones de todos los puntos (E, M, C) son similares, con oscilaciones de frecuencias más definidas en el extremo inferior del rango analizado ($2 a 8 \times 10^{-2}$ Hz). En el caso del cobre, la contribución en este rango a la potencia espectral es menor (0,01 a 0,02), siendo el evaporador el que tiene una contribución mayor, pero en todos los casos el espectro es muy apretado mostrando que hay presentes muchas frecuencias (figuras 5 a y b), algo característico de sistemas caóticos.

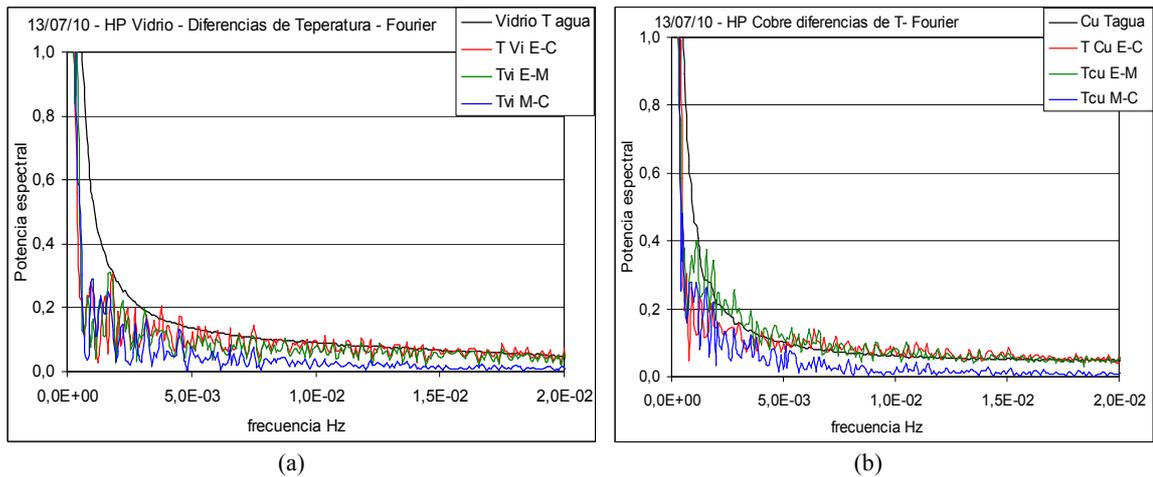


Figura 4. Espectro de Fourier de las diferencias de temperaturas medidas en a) el HP de vidrio y b) el HP de cobre.

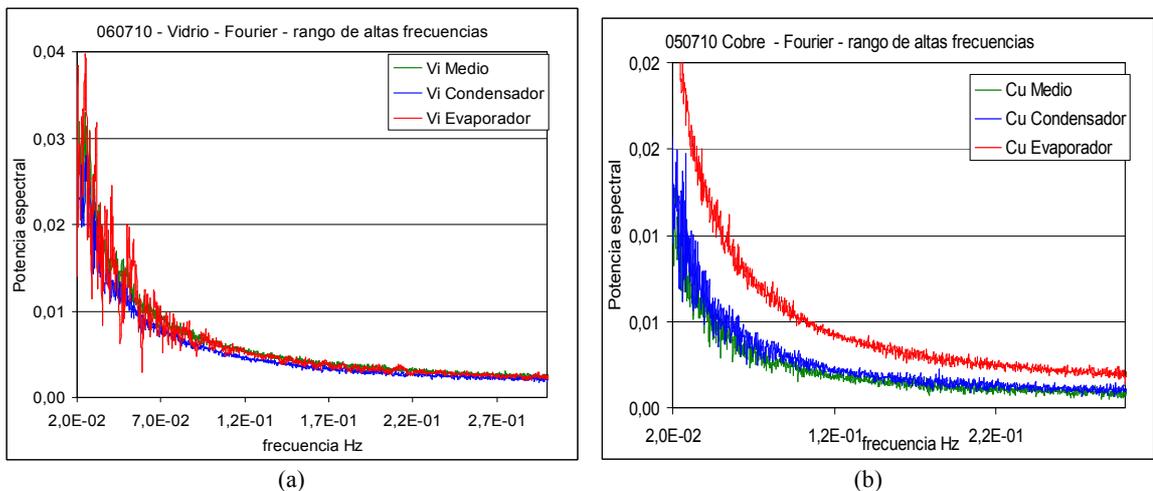


Figura 5. Espectro de Fourier de altas frecuencias de las temperaturas medidas en a) el HP de vidrio y b) el HP de cobre.

En el caso de las diferencias de temperaturas los espectros son notablemente distintos. El cobre muestra un espectro apretado de frecuencias presentes, con una graduación de importancia creciente: la menor en M-C, seguido por Tagua-E, E-C y el de mayor contribución es E-M (figura 6 a). El del vidrio muestra una contribución muy pequeña de M-C, espectros apretados y superpuestos de E-M y E-C y un espectro de frecuencias muy marcadas con contribución muy importante en el caso de Tagua-E. Esto muestra que la transferencia de energía entre el agua y el evaporador es pulsante aún en el rango de altas frecuencias (figura 6 b).

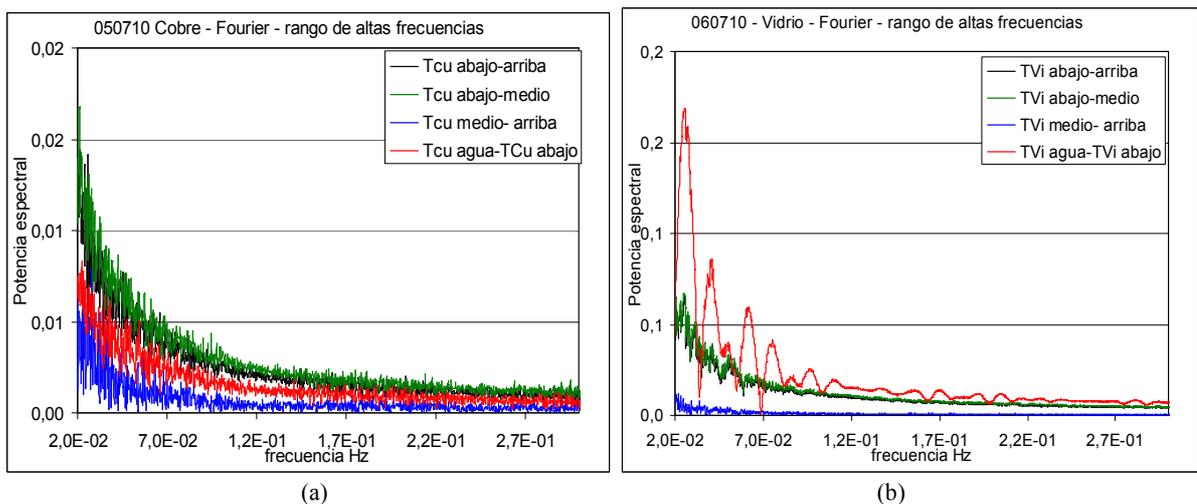


Figura 6. Espectro de Fourier de alta frecuencia de las diferencias de temperaturas medidas en a) el HP de cobre y b) el HP de vidrio.

COEFICIENTES DE LYAPUNOV

Los coeficientes de Lyapunov se calculan a partir de la siguiente relación en la que k es un índice que indica el k -ésimo término de la serie temporal medida $W_k = W(t_k)$. Si W_{k_0} corresponde a la serie inicial ($q=0$) y W_{k_q} corresponde a la serie desplazada inicialmente una cantidad $\Delta t_q = q\tau$, entonces $\Delta W_k = W_{k_0} - W_{k_q}$, $\Delta W_o = W_o - W_{q_0}$ y los coeficientes de Lyapunov resultan (Manneville, 2004; Strogatz, 1994).

$$\lambda_k = \ln \left(\frac{\text{abs}(\Delta W_k)}{\Delta W_o} \right)^{1/k} \quad (1)$$

A continuación se muestran algunas de las representaciones obtenidas de λ en función del tiempo.

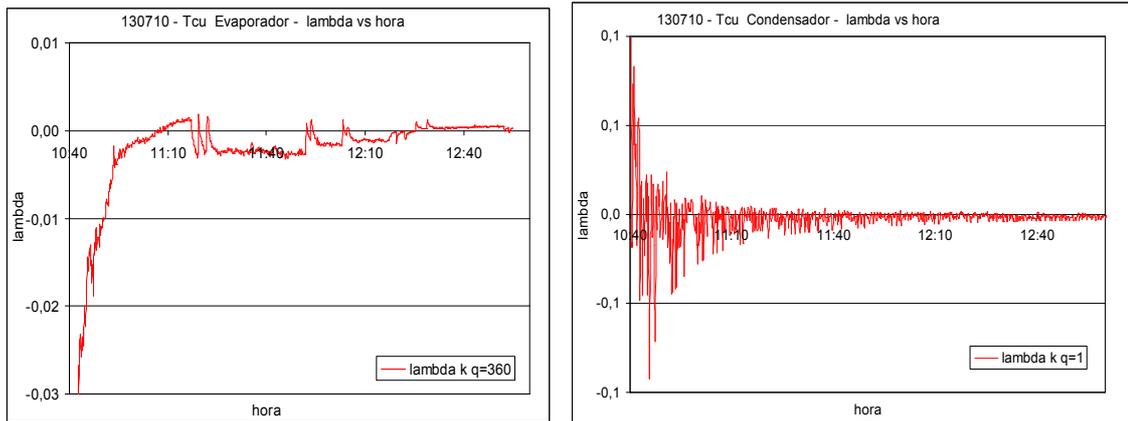


Figura 7. Coeficientes de Lyapunov en el HP de cobre de las temperaturas medidas en a) el evaporador y b) el condensador.

En el caso del cobre los λ correspondientes a la temperatura del evaporador toman valores positivos en rangos definidos para ciertos retardos q , como se muestra en la figura 7 (a) para $q = 360$ correspondiente a un retardo de 1 hora. En el condensador, λ toma muchos valores positivos para muchos retardos; la figura 7 (b) muestra los resultados obtenidos para $q=1$ equivalente a 10 segundos de retardo.

En el caso del vidrio, las series temporales correspondientes tanto el evaporador como al condensador muestran muchos λ positivos para distintos retardos q , como se muestra en las figuras 8 a y b.

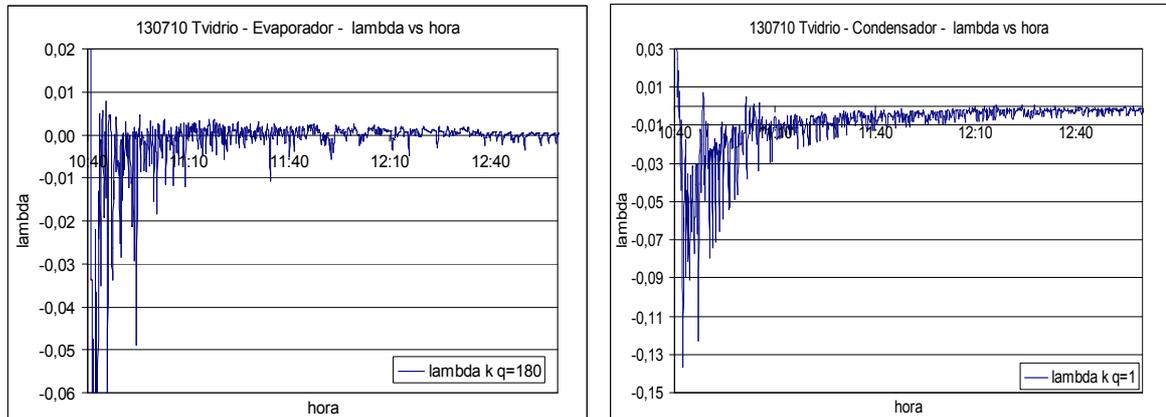


Figura 8. Coeficientes de Lyapunov en el HP de vidrio de las temperaturas medidas en a) el evaporador y b) el condensador.

Se calcularon también los coeficientes de Lyapunov correspondientes a las series temporales de la potencia térmica cedida por el agua, que es en definitiva la potencia extraída por el HP. En el caso del cobre, no se encontraron λ positivos (figura 9 a), mientras que en el vidrio λ toma valores positivos en un amplio rango de valores y para muchos retardos q (figura 9 b).

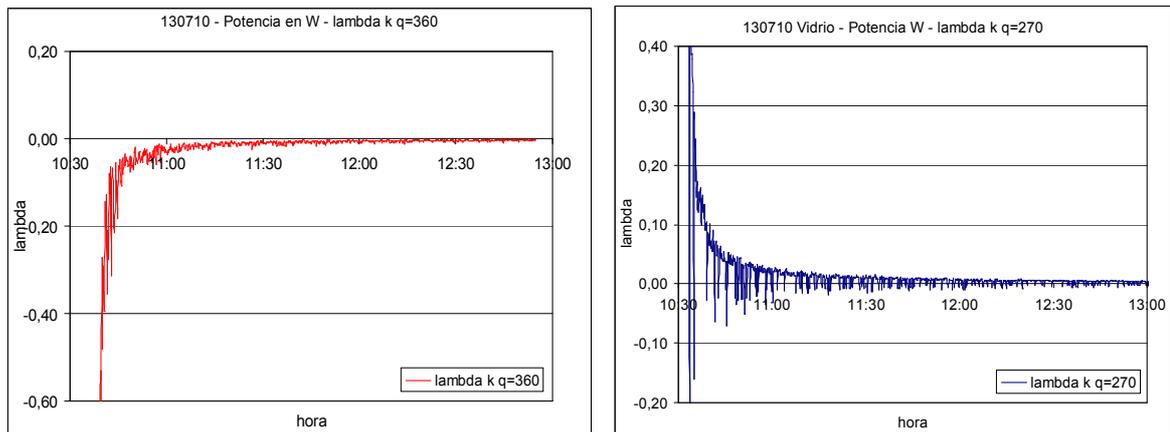


Figura 9. Coeficientes de Lyapunov de la potencia cedida por el agua en a) el HP de cobre y b) el HP de vidrio.

CONCLUSIONES

Los estudios realizados permiten concluir lo siguiente.

- La inspección visual de las series temporales medidas en E, M y C muestran pulsaciones que están en correspondencia con lo observado en las experiencias de visualización de flujos realizadas en el HP de vidrio, que muestran la formación de burbujas en el evaporador, que son expulsadas violentamente hacia arriba debido al aumento brusco de presión.
- La comparación con las medidas de temperatura en el HP de cobre permiten concluir que este comportamiento pulsante también se produce en éste, aunque su duración es menor (Frigerio et al. 2010).
- El análisis de Fourier de estas señales muestra que en ambas dominan las contribuciones de baja frecuencia; el espectro de altas frecuencias es muy apretado mostrando la contribución de muchas frecuencias, una de las características asociadas a la presencia de fenómenos caóticos. A altas frecuencias se observan diferencias notables entre en HP de cobre y el de vidrio, indicando que la diferencia dominante en las experiencias, la alta conductividad del cobre, más de 360 veces mayor que la del vidrio, tiene una influencia significativa en el comportamiento termo-hidrodinámico de los HP.
- Los coeficientes de Lyapunov positivos que son un indicador de la presencia de caos, se observaron en el cobre en algunas series temporales, para ciertos retardos q . Valores de λ positivos se encontraron con mayor frecuencia en el vidrio, durante intervalos de tiempo más largos y para un rango de valores de q mayor.
- Los λ calculados para la serie temporal asociada a la energía térmica extraída del agua no muestra valores positivos en el caso de cobre pero sí en el caso del vidrio. El resultado del cobre muestra cierta contradicción con los análisis de las señales de temperatura, lo que requiere realizar un análisis más profundo.
- Los estudios realizados permiten inferir un comportamiento caótico en el funcionamiento de los HP asistidos por la gravedad, con una influencia notable de la conductividad térmica del material con que están contruidos.
- El análisis realizado no agota los estudios que permiten detectar la presencia de caos por lo que es necesario continuar con las experiencias y análisis en esta línea a fin de llegar a conclusiones más firmes.
- El carácter pulsante y el comportamiento caótico observados no se pueden deducir de las teorías actuales sobre funcionamiento de los HP asistidos por la gravedad, por lo que se deben revisar las teorías tradicionales en uso.

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.
- Boccaletti, S., Gluckman, B. J., Kurths, J., Pecora, L. M., Meucci, R., Yordanov, O. Ed. (2004). Experimental Chaos. 8th. Experimental Chaos Conference - Italy, 2004. American Institute of Physics Conference Proceedings Vol 742. Melville, New York.
- 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., Perales, M. A., Ramos, I., Quintana, J., González C., Gündel, S., Ramos, B. (2006). Características caóticas del funcionamiento de un destilador. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. **Vol. 10**, versión CD, pp.03.07-03.13. ISSN. 0329-5184
- De Paul, I. (2007). Análisis de la intensificación caótica de la transferencia térmica convectiva en un destilador. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. **Vol. 11**, versión CD, pp.03.09-03.15. ISSN. 0329-5184.
- De Paul, I., Perales, M. A., González C., Quintana, J., Gündel, S., Ramos, B Ramos, I., Aguirre, G. (2007). Efectos de histéresis en la producción de un destilador. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. **Vol. 11**, versión CD, pp.03.17-03.23. ISSN. 0329-5184.

- De Paul, I. (2009). Evidence of chaotic heat enhancement in a solar still. *Applied Thermal Engineering*, **29**, N° 8-9, pp: 1840-1845 ISSN 1359-4311.
- 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.
- Filippeschi, S. (2009). On periodic two-phase thermosyphons operating against gravity. In. *Journal of Thermal Science*, **45**, 124-137
- 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., De Paul, I., Quintana J. (2010). Estudio comparativo del funcionamiento de tubos de calor en cobre y vidrio. Enviado a evaluación para ser presentado en la XXXIII Reunión de Trabajo de Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente (Salta, 15 al 18 de noviembre de 2010).
- Ivanovskyii, 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., (a) (2003). Understanding operational regimes of closed loop pulsating heat pipes: an experimental study. *Applied Thermal Engineering*, **23**, 707-719.
- 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, 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.
- Manneville, P. (2004). *Instabilités, chaos et turbulence*. Editions de l'École Polytechnique. Francia
- Qu, J., Wu, H., Cheng, P., Wang, X. (2009). Non linear analyses of temperature oscillations in a closed pulsating heat pipe. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **52**, 3481-3489
- 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.
- Song, Y., Xu, J. (2009). Chaotic behaviour of pulsating heat pipes. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **52**, 2932-2941.
- Strogatz, S. H. (1994) *Nonlinear dynamics and chaos*, Perseus Books Publishing, Cambridge, Massachusetts, USA.
- Yang, H. Khandekar, S., Groll, M. (2009) Performance characteristics of pulsating heat pipes as integral thermal spreaders. *Int. Journal of Thermal Sciences*, **48**, 815-824.

ABSTRACT

Temporary series of measurements realized on gravity assisted heat pipes built in copper and glass were performed in order to detect the presence of chaotic phenomena in his functioning. In such a case, the influence of a chaotic behaviour on the energy extracted from the warm source could be studied. The flow visualization realized in the heat pipe of glass was an important tool in this study that facilitated the analysis of the measured temperature temporary series. In the present work only two indicators of the presence of chaos were analyzed: the spectrum of Fourier and the exponents of Lyapunov. The results show that under certain conditions the copper heat pipe as well as that built on glass show chaotic behaviour, more in that of glass than in that of copper, with a notable influence of the high thermal conductivity of copper.

Keywords: gravity assisted heat pipe, energy transfer, chaos.