



VISUALIZACION DE FLUJOS EN UN TUBO DE CALOR ASISTIDO POR LA GRAVEDAD

I. De Paul, E. Frigerio, D. Hoyos, J. Quintana
Universidad Nacional de Salta - Av. Bolivia 5150 - 4400 Salta
TE: 387-255424 - E-mail: depaul@unsa.edu.ar

RESUMEN: Se ensayó un tubo de calor asistido por la gravedad con agua destilada como fluido de transferencia, en el que se realizó visualización de flujos, comprobándose la existencia de un comportamiento pulsante. El calor absorbido en el evaporador genera burbujas que ascienden rápidamente desplazando a veces un volumen importante de agua. Se midió la velocidad y aceleración de ascenso de estos volúmenes, el intervalo de pulsación y la evolución del volumen de agua en función del tiempo. El empleo de procesamiento digital de imágenes para medir la velocidad permitió detectar la presencia de masas de vapor en ascenso dentro del tubo, algo que a simple vista no se puede observar.

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

INTRODUCCIÓN

Para tener capacidad de realizar control sobre la transferencia térmica en cualquier dispositivo es fundamental saber cómo funciona, es decir, conocer los procesos físicos por los cuáles el dispositivo funciona como lo hace. Los tubos de calor son sistemas conocidos desde hace décadas, que transfieren energía térmica con altísima eficiencia, que tienen un muy amplio campo de aplicaciones en la tecnología nuclear, espacial, solar, electrónica, etc. [Chi, 1976, Dunn y Reay, 1976, Ivanovskiyii, 1982, Khandekar, 2004, Liao y otros 2007].

Generalmente consisten en un tubo cerrado o cámara que puede tener distintas geometrías, con una mecha o malla adosada a su pared interna y un líquido en equilibrio con su vapor. El líquido absorbe calor y se evapora en un extremo (sección evaporadora), el calor latente del vapor es transportado por convección al otro extremo donde se condensa (sección condensadora) entregando calor. El condensado vuelve por capilaridad al extremo inicial por la mecha o malla cerrando el ciclo; este efecto es especialmente importante cuando los tubos de calor operan horizontalmente. 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”). La figura 2 esquematiza el funcionamiento de estos últimos. [Anwarul Hasan y otros, 2003, Joudi y Witwit, 2000].

Un caso particular son las llamados “tubos de calor de ciclo cerrado” (“closed loop pulsating heat pipes, CLPHPs”) utilizados en electrónica que emplean tubos capilares, cerrados, dispuestos como una especie de bobinado (figura 1) 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 y otros, 2002, Khandekar y otros (a), 2003, Charoensawan y otros 2003, Khandekar y otros (b) 2003]

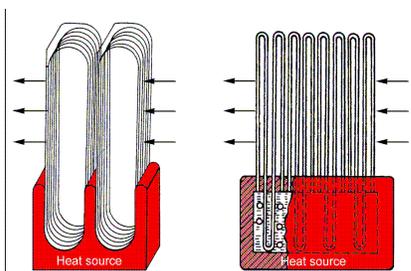


Figura 1. Heat pipes pulsantes descritos por Akachi (1993-1996).

Se supone que los tubos de calor asistidos por la gravedad operan de manera continua según el esquema de la figura 2 pero hay pocas referencias acerca de experiencias de visualización de flujos que muestren qué es lo que ocurre realmente en el interior de los tubos de calor, y éstas se encuentran referidas principalmente a CLPHPs. El objetivo del presente trabajo es estudiar el comportamiento termo-fluidodinámico de un tubo de calor asistido por la gravedad ante distintas potencias suministradas al evaporador, empleando agua como fluido de transferencia, visualizando el flujo en su interior.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Se construyó un tubo de calor de 0.66 m de largo empleando una bureta de 0.0113 m de diámetro interno 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 empleó como fuente de calor agua termostatazada colocada en un termo provisto de una tapa de poliuretano expandido de alta densidad que permite introducir el tubo de calor y las termocuplas. La figura 2 muestra un esquema del tubo de calor construido mientras que la figura 3 muestra una imagen de la disposición experimental del tubo, el termo y las termocuplas de medida. La longitud del segmento introducido en el termo que actuó como evaporador fue de 0.12 m; la zona adiabática fue de 0.05 m mientras que el resto, una longitud de 0.49 m, actuó como condensador evacuando calor al ambiente.

Se realizaron medidas térmicas para lo cuál se midió la temperatura en los extremos inferior ($T_{\text{evaporador}}$) 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 controlado por computadora con intervalos de medida de 2 segundos y 1 minuto. Esto permitió calcular la potencia transmitida, la resistencia térmica del tubo, R y el coeficiente global de transferencia térmica UA .

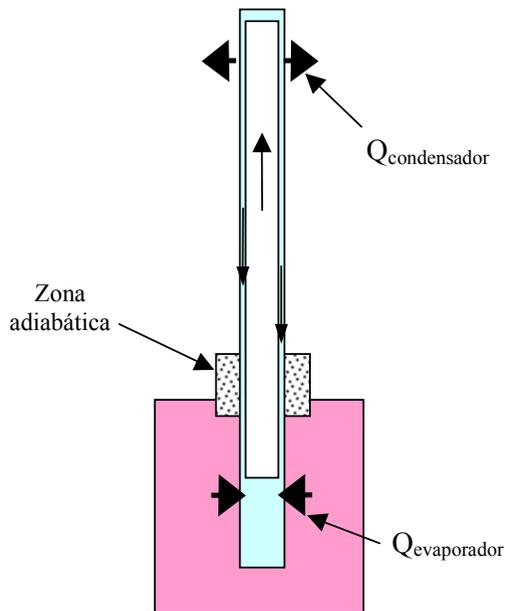


Figura 2. Esquema de funcionamiento de un tubo de calor asistido por la gravedad.

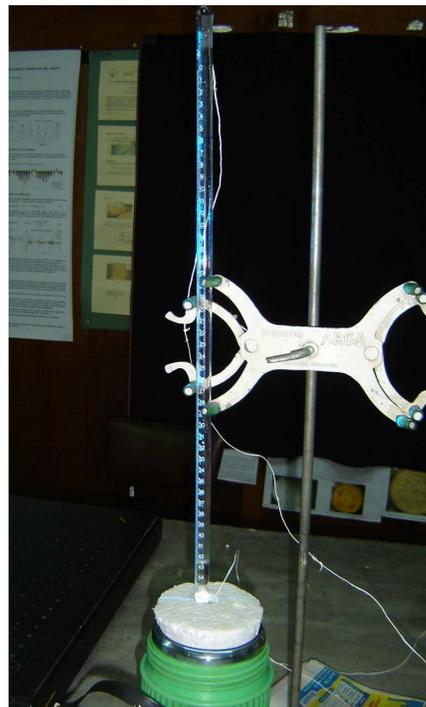


Figura 3. Disposición experimental del tubo, del termo y las termocuplas de medida.

En las experiencias de visualización de flujos se empleó en principio un laser de Argón sintonizable en una longitud de onda de 480 nm (azul), y una lente cilíndrica que permite generar un plano luminoso que incide a lo largo del tubo (figura 4). Se filmaron las experiencias empleando una cámara de video Panasonic y con una cámara fotográfica digital Sony se tomaron fotografías en modo multirráfaga con un período de 1/30 s entre tomas.

Se empleó un método no perturbativo para medir la velocidad del fluido en el tubo, para lo cuál se dispuso una cámara Sparklan controlada por una computadora, que desde el programa IPViewpro permite tomar imágenes digitalizadas a razón de 10 imágenes por segundo, para ser luego procesadas con el programa Scilabpro. Debido a que la potencia del haz del laser reflejado en el tubo de vidrio saturaba la cámara que medía velocidad dificultando la visualización, se optó por trabajar con la iluminación normal del laboratorio (figura 5).

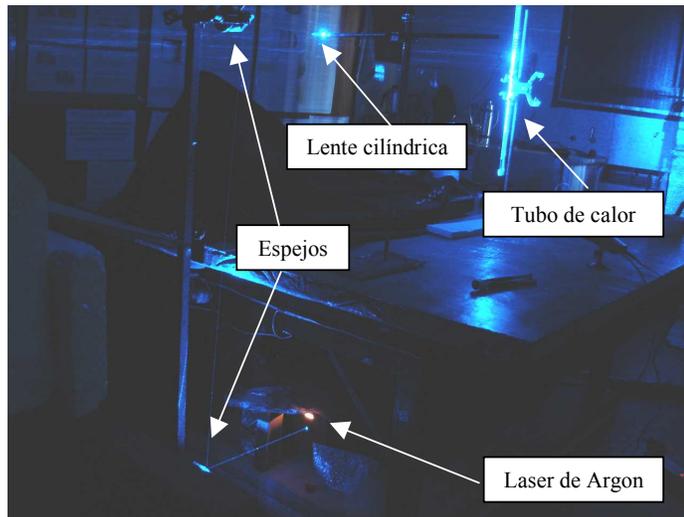


Figura 4. Disposición para visualización de flujos usando laser.

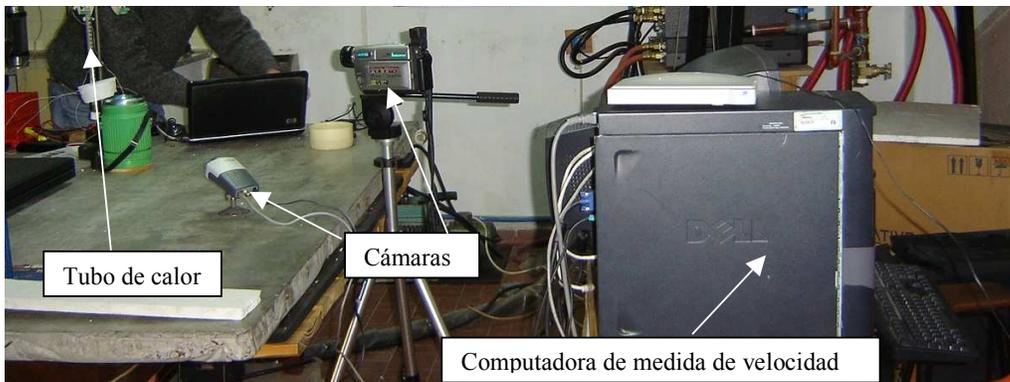


Figura 5. Disposición para medida de velocidad empleando computadora.

VISUALIZACIÓN DE FLUJOS

El procedimiento seguido fue agregar agua termostatazada en el termo mientras se realizaban medidas de temperatura, filmando simultáneamente con la cámara de video y la de medida de velocidad, realizando al mismo tiempo fotografías de lo que se observaba en el tubo de calor.



a) Menisco superior del agua en el tubo.

b) Vaporización

c) Ascenso rápido del vapor.

Figura 6. Etapas del desarrollo de la pulsación.

El proceso general se desarrolla de la siguiente manera: al comienzo se observa el menisco superior del agua contenida en el tubo, prácticamente enrasado a la altura del telgopor (figura 6a); a continuación se produce una rápida vaporización (figura 6b) y ascenso a lo largo del tubo (figura 6c). Durante el ascenso se produce condensación sobre el vidrio, a veces se forma una gota o película de agua líquida que alcanza el extremo superior (figura 7). Ya sea en forma de vapor o agua líquida el impacto sobre el extremo del tubo se escucha como un disparo. El agua condensada en el extremo superior se desliza hacia abajo formando una película que lentamente se va rompiendo hasta que se recupera aproximadamente el nivel inicial del agua, momento en que comienza nuevamente a pulsar. Este proceso se mantiene durante horas, hasta que la potencia que suministra el agua desciende por debajo del límite de ebullición. No se encontró en la bibliografía consultada un

comportamiento pulsante como el observado, en tubos de calor asistidos por la gravedad. [Khandekar, 2004, Khandekar y otros (b), 2003].

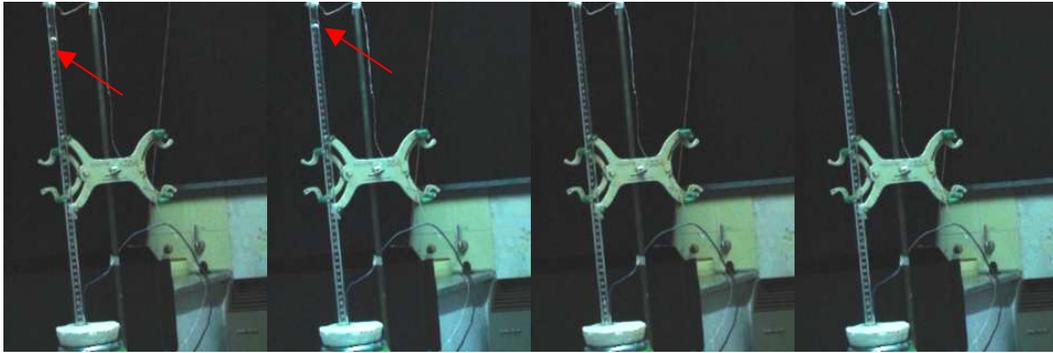


Figura 7. El vapor condensa en forma de gota en el extremo superior del tubo.

Las medidas térmicas realizadas permitieron comprobar que la potencia suministrada en el evaporador durante estas experiencias creó en el interior del tubo condiciones que permitieron la nucleación y crecimiento de burbujas que pueden ser expulsadas con fuerza hacia arriba, tal como se observó en todas las experiencias realizadas. Todo es muy rápido, a veces el vapor expulsado no llega a condensar, otras veces se forman burbujas en el evaporador que elevan un volumen de agua importante, siendo la pulsación dependiente de la temperatura del agua. El rango de potencias suministrada al evaporador fue de 8.6 W a 18.4 W y su influencia está dada por la temperatura inicial del agua en el termo: a 89 °C la pulsación es inmediata, mientras que a 60°C demora un tiempo en comenzar. A menos de 50°C no se observó pulsación.

MEDIDAS DE VELOCIDAD

En una de las experiencias en las que la temperatura máxima del agua alcanzó los 89°C la toma de fotografías en el modo ráfaga permitió seguir la evolución de cuatro volúmenes de agua consecutivos, medir su velocidad de ascenso, la variación del volumen de agua desplazado, que disminuye al ascender generando una película sobre el vidrio del tubo, y medir la frecuencia de la pulsación. Las imágenes se muestran en la figura 8 mientras que la figura 9 muestra la tercera serie de la misma imagen procesada para definir con mayor precisión la posición de los meniscos superior e inferior del agua durante su evolución.



Figura 8. Fotografías en modo ráfaga.

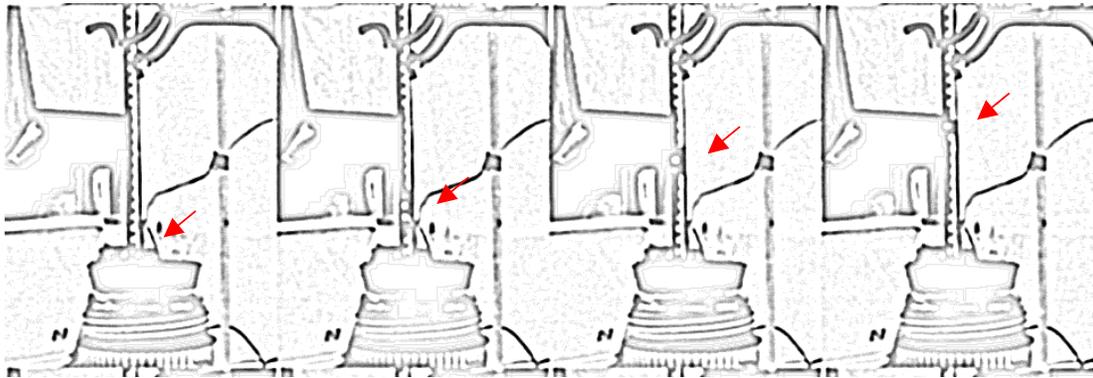


Figura 9. La tercera secuencia de misma imagen, procesada mostrando en ascenso del menisco.

La figura 10 muestra la posición del menisco superior en función del tiempo y un ajuste polinómico de grado 2, que permite conocer la velocidad y aceleración de avance correspondiente a cada una de las cuatro secuencias de imágenes tomadas. La figura 11 muestra la evolución del volumen de agua desplazado en función del tiempo, que disminuye por adherencia en la superficie de vidrio del tubo.

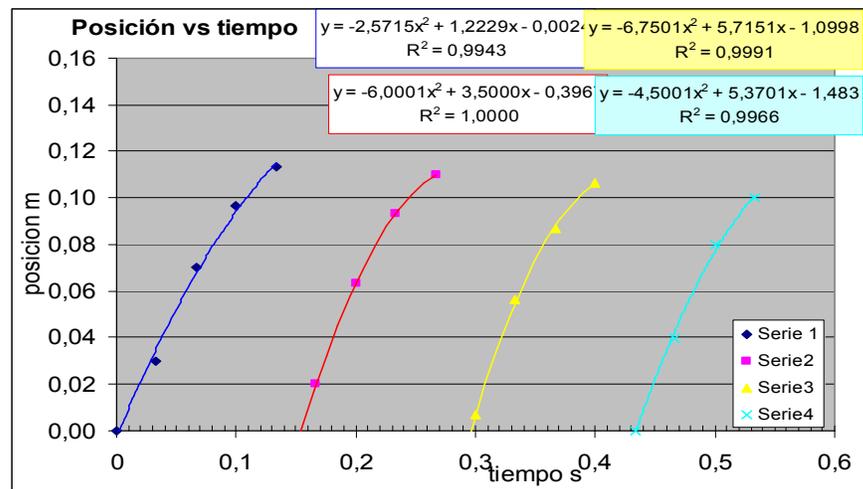


Figura 10. Posición del menisco en función del tiempo.

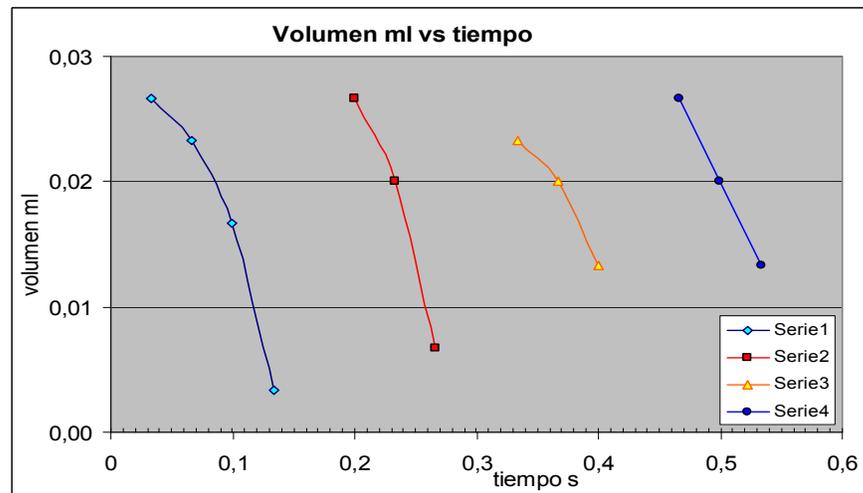


Figura 11. Volumen de agua desplazado en función del tiempo

Los promedios correspondientes a las cuatro series se muestran en la Tabla I, junto con el volumen de agua desplazado V y el periodo de pulsación en segundos, p , medido gráficamente sobre la figura. Este valor se puede comparar con el periodo que realmente corresponde dado por la frecuencia de toma de imágenes de la cámara, que es de 0.133 s.

Valores promedio				
	v [m/s]	a [m/s]	p [s]	V [cm ³]
serie 1	1,22	-2,57		0,018
serie 2	3,50	-6,00	0,16	0,018
serie 3	5,72	-6,75	0,14	0,019
serie 4	5,37	-4,50	0,14	0,020

Tabla I. Promedios de velocidad, aceleración, pulsación y volumen desplazado, correspondientes a las cuatro series observadas.

MEDIDAS DE VELOCIDAD CON COMPUTADORA

Las figuras 12 y 13 muestran dos imágenes tomadas con una diferencia de 0.1167s que corresponden a la etapa de formación de vapor y condensación en forma de gota en el extremo superior, en una experiencia en la que la temperatura del agua del termo fue de 70°C.

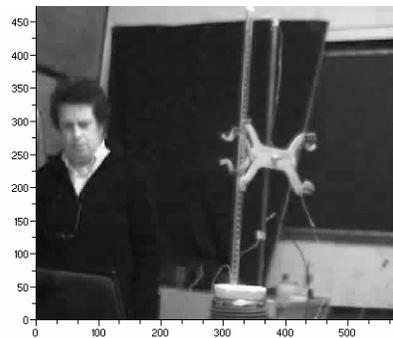


Figura 12. Estado inicial.

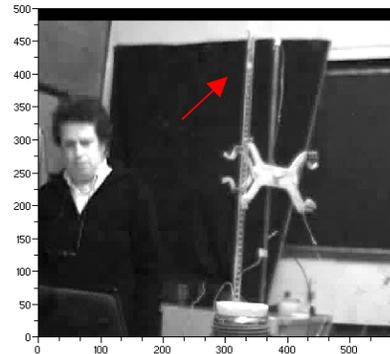


Figura 13. Estado final.

La figura 14 muestra la imagen diferencia de ambas, procesada digitalmente para definir mejor los bordes, que muestra en la parte central la posición de tres pulsos de vapor, correspondiendo el extremo superior del más alto a la imagen de la gota que se ve en la figura 13. Midiendo su posición a lo largo del tubo se puede calcular la velocidad media a la que el vapor fue desplazado hasta su condensación en forma de gota, obteniéndose el valor de 3.79 m/s que está en coincidencia con el rango de valores obtenidos con el método anterior. La figura 14 pone en evidencia algo que a simple vista no se puede ver: la presencia de otros pulsos de vapor dentro del tubo, además de la gota que condensó.

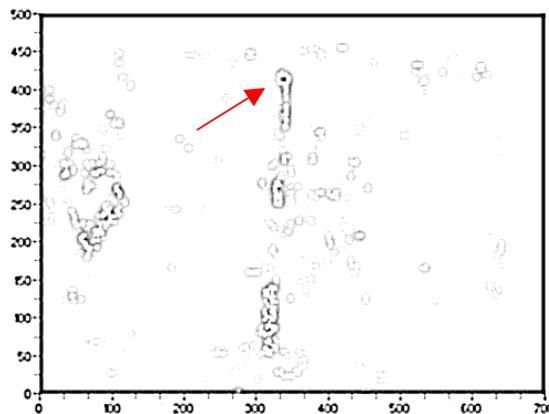


Figura 14. Imagen diferencia que muestra la posición de pulsos de vapor a lo largo del tubo.

CONCLUSIONES

Las experiencias realizadas permitieron comprobar que en el rango de potencias ensayado, 8.6 a 18.4 W el tubo de calor asistido por la gravedad, que emplea agua como fluido de transferencia, se comporta de manera pulsante, transfiriendo calor al condensador no sólo en forma de calor latente del vapor sino también en forma de calor sensible, por el agua desplazada durante la pulsación. Este comportamiento pulsante no se observó a temperaturas del agua menores a 50°C.

Con el condensador en contacto con el ambiente la transferencia pulsante se mantiene durante horas, hasta que la potencia suministrada por el agua al evaporador desciende por debajo del límite de ebullición.

La velocidad de ascenso del agua en el tubo medida con la cámara fotográfica a $T_{\text{agua}} = 89^{\circ}\text{C}$ fue de 1.2 a 5.7 m/s, mientras que la aceleración fue negativa entre 2.6 y 6.7 m/s^2 . El volumen de agua promedio desplazado en las pulsaciones medidas fue de 0.020 cm^3 y el intervalo promedio entre pulsaciones fue de 0.14 s.

El empleo de procesamiento digital de imágenes permitió detectar el desplazamiento de masas de vapor a lo largo del tubo, que a simple vista no se pueden ver, y medir su velocidad obteniéndose 3.8 m/s para $T_{\text{agua}} = 70^{\circ}\text{C}$.

Los resultados obtenidos muestran un comportamiento termofluidodinámico pulsante en los tubos de calor asistidos por la gravedad que hasta ahora no fue reportado en la bibliografía consultada.

BIBLIOGRAFÍA Y 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.
- Dunn, P.D., Reay, D.A. (1976). *Heat Pipes*, Pergamon Press.
- 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., 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

A gravity assisted heat pipe with distillate water as transfer fluid was built on which flow visualization experiments were performed, showing a pulsating behaviour. The heat absorbed at the evaporator generates bubbles that rise very quickly, displacing sometimes an important volume of water. The rise velocity and acceleration were measured as function of time, as well as the pulsating interval and the displaced water volume. The use of digital image processing allowed to detect the presence of ascending vapour masses inside the tube, that were not visible at a glance.

Keywords: gravity assisted heat pipe, energy transfer, flow visualization