

ENSAYOS DE CARACTERIZACION DE HEAT PIPES

E. Mezzabolta*, N. Bonadeo*, H. Bajano*
A. Vicente*, J. Farias* y A. Rapallini*

RESUMEN.

Con el propósito de medir la capacidad máxima de transferencia de calor de un heat pipe, perteneciente a un colector solar plano, se diseñó y construyó un aparato destinado a tal fin, y se realizaron las correspondientes experiencias de calibración y de medición.

ANTECEDENTES.

En el año 1975 la firma alemana DORNIER, en colaboración con la subsidiaria RWE Energietechnik GmbH, equipaba la primera casa solar realmente habitada de Alemania, construida en la ciudad de Essen, con una instalación solar para el calentamiento de agua y calefacción de ambientes. Ese equipamiento incluía una serie de colectores solares planos que DORNIER lanzaba al mercado.

Estos colectores de la energía solar para uso terrestre, estaban compuestos por un conjunto de heat pipes, que eran el resultado de la experiencia acumulada por la empresa, a través de muchos años, en la producción y aplicación de los mismos para transporte de calor en sistemas espaciales.

Como resultado de un acuerdo Argentino-Alemano de transferencia de tecnología, un colector de ese tipo llegó a la C.N.I.E., donde fué ensayado para determinar sus características y, posteriormente, pasó a la División Energía Solar, de la C.N.E.A.

Disponiendo de uno de dichos colectores, y teniendo la oportunidad de obtener más información acerca de las características del mismo, se decidió extraer uno de los seis (6) heat pipes que lo componían, para efectuar sobre él todas las determinaciones que fuesen posibles.

INTRODUCCION TEORICA.

Tal como fuera concebido originalmente por R. S. Gaugler, en 1942, el heat pipe es un elemento destinado al transporte de calor entre dos fuentes térmicas a diferentes temperaturas.

Su aspecto externo más común es el de un tubo, sellado en ambos extremos y de sección transversal circular. Estos extremos se hallan inmersos en las fuentes caliente y fría, respectivamente.

En su interior evoluciona cíclicamente un fluido de trabajo, el que, al pasar de líquido a vapor en el extremo sumergido en la fuente caliente (y que actúa como evaporador del heat pipe), trans-

*
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
Depto. Fuentes Renovables y Uso Racional de la Energía
Av. del Libertador 8250 - 1429 Buenos Aires.

porta el calor latente del cambio de fase hacia el otro extremo del tubo (el que actúa como condensador), y que está sumergido en la fuente fría. Entre la fuente caliente y la fría existe una zona donde no se produce intercambio de calor con el exterior. A esta parte del heat pipe se la conoce como zona adiabática, y su presencia no es indispensable para el funcionamiento del mismo. En la cara interna de la pared del tubo, se halla incluida una estructura de tipo poroso, a través de la cual retorna el fluido de trabajo en estado líquido, para reiniciar el ciclo térmico.

La capacidad de transporte de calor del heat pipe va a depender de las propiedades físicas del fluido, de las características de la estructura porosa, de la tensión superficial entre esta y el fluido, de la capacidad de conducción de calor de las paredes del tubo y de la resistencia térmica entre el tubo y las fuentes fría y caliente. A diferentes regímenes de transporte de calor, les corresponden diferentes perfiles de temperatura a lo largo del heat pipe. En estado de régimen estacionario la temperatura en el interior del heat pipe debería ser uniforme, por contener un fluido en estado de vapor, en equilibrio con su líquido. Pero las caídas de presión, tanto en el vapor como en el líquido, como consecuencia de la circulación, hacen que haya diferentes presiones de equilibrio a lo largo del tubo, y como consecuencia de ello, diferentes temperaturas en la interfase líquido-vapor. Si bien estas caídas de temperatura entre el evaporador y el condensador existen en todos los heat pipes, su valor es relativamente bajo.

A medida que se incrementa el suministro de calor en el evaporador del heat pipe, éste responderá aumentando su capacidad de transporte, hasta que llegará a un estado de operación en el que dejará de conducir. A esta característica se la conoce como "límite de la capacidad de conducción del heat pipe", o "capacidad máxima de transferencia de calor".

Existen cuatro causas identificadas que limitan la capacidad de conducción de un heat pipe:

Límite por capilaridad. Este límite se alcanza cuando la presión capilar máxima disponible, no alcanza a vencer la diferencia de presión existente entre el vapor y el líquido. En estas condiciones no hay suficiente presión de bombeo como para que el líquido siga circulando.

Límite sónico. Se llega a él cuando la velocidad de circulación del vapor en el interior del tubo alcanza valores iguales o superiores a la velocidad de propagación del sonido en ese medio. Entonces, en el seno del vapor, se producen ondas de choque que terminan por destruir la continuidad del flujo.

Límite de arrastre. Cuando la velocidad del vapor alcanza valores muy elevados, en la interfase líquido-vapor se produce un arrastre superficial del líquido que está retornando por la estructura porosa, produciéndose un estado de régimen inestable en la circulación del líquido que, de persistir las condiciones exteriores, termina por interrumpirse.

Límite por ebullición. Cuando el flujo de calor a través de la pared del evaporador es muy elevado, se pueden producir burbujas de vapor en el seno del líquido, en la interfase tubo-estructura

porosa. Si estas burbujas progresan y terminan por nuclearse, formando grandes huecos en el líquido, sobreviene la interrupción en la circulación del mismo.

De los cuatro límites expuestos, el de menor valor es el que determina el límite de la capacidad de conducción de calor del heat pipe.

CARACTERISTICAS DEL HEAT PIPE ENSAYADO.

En la Fig. 1 se muestran el aspecto y las dimensiones del heat pipe a ensayar, así como las del colector solar del cual fué extraído. El heat pipe está compuesto por un tubo y una aleta captadora de la radiación solar, solidariamente unida a él y con el cual constituye una única pieza, la que, según los datos que provee el fabricante, está construida íntegramente en una aleación de aluminio (AlMgSi 0,5). El conjunto posee un recubrimiento selectivo del tipo negro Eloxal.

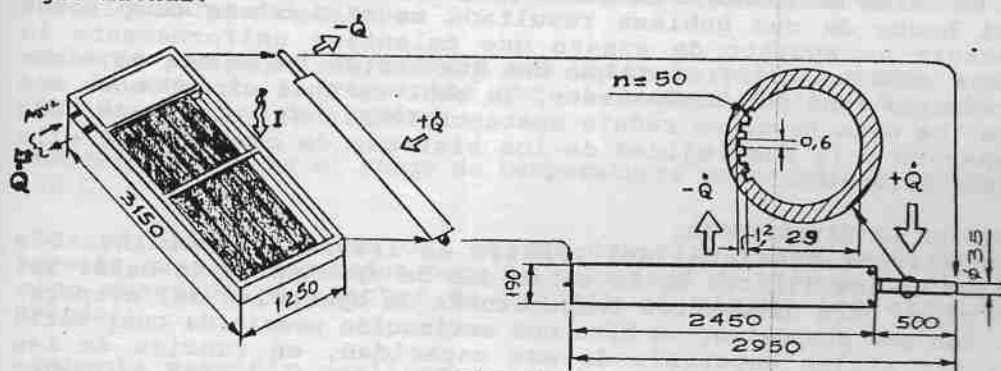


Fig. 1.

El tubo que constituye el heat pipe propiamente dicho, está herméticamente cerrado en ambos extremos, y tiene en su cara interior un ranurado en toda su longitud, el cual cumple las funciones de una estructura porosa. En el interior del tubo se halla alojado el fluido de trabajo, que es Freon R 113.

Este heat pipe tiene dos zonas bien diferenciadas. Una de ellas, denominada evaporador, es la que corresponde a la longitud del tubo sobre la cual está adosada la aleta captadora de la radiación solar. En esta zona el heat pipe absorbe calor y se produce la evaporación del fluido de trabajo. La otra zona, denominada condensador, es la que corresponde a la parte cilíndrica del tubo, sin aleta de captación. En ella, el fluido de trabajo se condensa y entrega su calor latente de cambio de fase al agua del circuito de consumo, a través del intercambiador de calor. En este heat pipe no se halla presente la tercera zona, denominada adiabática, y que es común en la mayoría de los heat pipes.

La posición normal de funcionamiento del colector solar Dornier es inclinado, de acuerdo a la latitud del lugar de instalación, y con su intercambiador de calor ubicado en la parte alta del mismo. En esta posición, el condensador del heat pipe queda ubicado en su parte superior. Esta ubicación hace que el fluido de trabajo contenido en su interior, por acción de la gravedad, se acumule en la parte inferior del tubo. Como consecuencia de ello el heat pipe sólo funcionará cuando el calor sea suministrado al mismo por el

evaporador, que es donde se encuentra el fluido que puede evaporarse. Por lo tanto, si por alguna circunstancia se llegara a invertir el flujo del calor en el condensador y en el evaporador, el heat pipe dejaría de funcionar automáticamente. Este hecho hace que el heat pipe, en esos casos, actúe como un diodo térmico, impidiendo que el colector solar funcione en condiciones equivalentes a la del caso de la circulación por termosifón inverso, como ocurre en aquellas instalaciones clásicas de un colector solar plano conectado directamente al tanque de acumulación.

No obstante esta propiedad muy particular del heat pipe, que le impide operar en forma inversa o reversible, durante los ensayos se lo hizo funcionar exactamente al revés que en las condiciones normales de operación. Para ello se recurrió a un artilugio: eliminar la acción de la gravedad durante el ensayo, disponiendo el heat pipe en forma horizontal. La razón para actuar de esta forma reside en el hecho de que hubiese resultado muchísimo más complicado construir un aparato de ensayo que calentase uniformemente la extensa zona del evaporador, que uno que hiciese lo mismo, pero con la reducida zona del condensador, la cual es unas cinco veces más corta. De esta forma se redujo sustancialmente el volumen de todo el aparato y la complejidad de los sistemas de control que ello hubiera originado.

OBJETO DE LA EXPERIENCIA.

El objetivo fundamental del trabajo es llegar a determinar los valores de los límites de la capacidad de transporte de calor del heat pipe, para diferentes temperaturas de operación del evaporador. Con ese propósito, se hizo una estimación previa de cual sería el valor máximo esperable de esa capacidad, en función de las características del heat pipe. Para ello se siguieron dos criterios diferentes.

De acuerdo con el primero, se calculó la capacidad máxima de transporte en base a los modelos de la teoría clásica de heat pipes, utilizando como datos los que resultaron de las mediciones realizadas directamente sobre el heat pipe, además de los que se obtuvieron de los folletos de la firma DORNIER.

No obstante ello, faltaba un dato fundamental: las dimensiones de las ranuras longitudinales y su cantidad. Para determinarlas, se tomaron dos series de radiografías de uno de los extremos del tubo: la primera, perpendicular al eje longitudinal del mismo, y la segunda serie, con una leve inclinación respecto de la posición anterior, para resaltar la forma de las ranuras. En base a ellas se pudo estimar en 46 el número de ranuras, y las dimensiones de las mismas en 0,8 mm de ancho por 1,2 mm de profundidad, con una separación entre ellas de 1,2 mm. El diámetro exterior de la zona cilíndrica del condensador, es de 34,7 mm. A través de las radiografías se estimó el diámetro interior en 28,7 mm, con un espesor de pared del tubo, en la parte alta de la ranura, de 3 mm.

Con estos datos, los cálculos teóricos daban un límite de la capacidad de transporte de calor del heat pipe, de unos 30 W. Este valor es el que se obtiene cuando se alcanza el límite de conducción por capilaridad, como ocurre en la mayoría de los heat pipes que trabajan a bajas temperaturas.

En el segundo criterio de cálculo, se supuso que el heat pipe había

sido diseñado para transportar la máxima potencia térmica que podía captar a través de su aleta colectora de la radiación solar, en condiciones ideales. Es decir, se supuso al colector ubicado en el espacio extraterrestre, en donde la radiación solar que le llegaría sería la de la constante solar (1200 W/m^2). De acuerdo con este segundo criterio, la capacidad máxima de transporte de calor del heat pipe debería estar por encima de los 460 W. Este valor es el que se utilizó para definir la potencia que debería entregar el aparato de ensayo a utilizar.

APARATO DE ENSAYO.

Se diseñó y construyó un aparato que fuese capaz de cumplir con las siguientes exigencias:

-Debería proveer al evaporador del heat pipe a ensayar un flujo de calor estable en el tiempo, y con un perfil uniforme de temperaturas a lo largo del mismo.

-Debería ser capaz de generar una potencia térmica igual o mayor que la suma de la requerida por el heat pipe (460 W), más las pérdidas propias del equipo.

-Debería operar en el rango de temperaturas comprendidos entre 20 y 120 C.

-Las pérdidas térmicas del equipo deberían tener valores mucho menores que los esperados para la capacidad de transporte del heat pipe ensayado, a efectos de reducir al mínimo los errores de método.

-Debería permitir realizar ensayos en diferentes ángulos con respecto a la horizontal.

Para satisfacer la primer exigencia, se decidió que el método más apropiado era sumergir el evaporador del heat pipe (o lo que sería su condensador, en condiciones normales de operación en el colector solar), en el seno del vapor de agua de una pequeña caldera. Partiendo de esta idea, se diseñó y construyó un aparato cuyo aspecto puede verse en la Fig. 2. Está compuesto por tubos de acero al carbono, sin costura, en su mayoría de 50,8 mm (2") de diámetro nominal, soldados por el método TIG.

El aporte de calor a la caldera se efectúa por medio de tres resistencias calefactoras de 330 W cada una, montadas en un cabezal roscado y sumergidas en agua destilada. Estas resistencias son alimentadas por una fuente estabilizada de tensión, que provee una potencia eléctrica sumamente estable. La presión en el interior del recinto se mide por medio de un manovacuómetro de aguja. El heat pipe se introduce en la caldera por el extremo A, a través de un orificio sellado por medio de dos aros toroidales (O-rings) de buna N. Por el extremo B se conecta la caldera a una bomba mecánica de vacío. Todas aquellas partes del aparato que estén en contacto con el agua o su vapor, están aisladas con una capa de lana mineral de

50 mm de espesor, y recubiertas con una lámina de aluminio brillante, a los efectos de reducir al mínimo las pérdidas térmicas. La extracción de calor del heat pipe se realiza a través de la aleta colectora de la radiación solar, por medio de una corriente

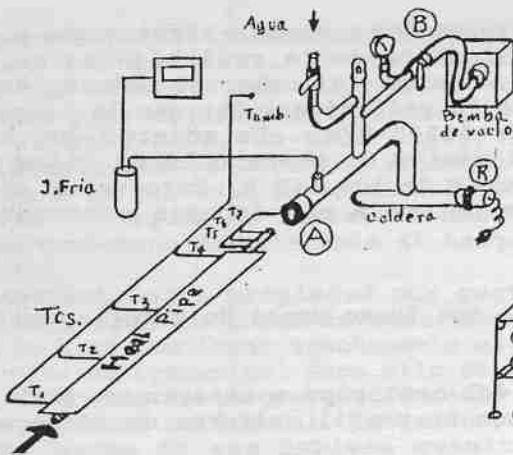


Fig. 2.

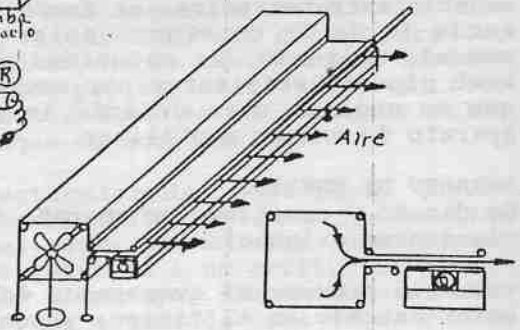


Fig. 3

de aire que circula transversalmente sobre ella. La convección forzada del aire se logra por medio de un ventilador de velocidad variable, el cual sopla sobre un canal con su fondo cerrado dispuesto paralelamente al heat pipe, y con una abertura longitudinal que desemboca sobre la aleta a enfriar. Un esquema de esta disposición se puede ver en la Fig. 3.

Las temperaturas a lo largo del heat pipe se miden por medio de 7 termocuplas tipo T (cobre-constantan). Tres de ellas están ubicadas sobre el evaporador (dentro de la caldera) y las otras cuatro sobre la aleta colectora, o condensador en el ensayo. También se utiliza una termocupla del mismo tipo para medir la temperatura ambiente en las proximidades del equipo.

DESARROLLO DE LAS EXPERIENCIAS.

Las experiencias realizadas se dividen en dos grupos: determinación de pérdidas del equipo y medición del heat pipe.

Una vez que el aparato ha sido llenado con la cantidad de agua destilada necesaria, antes de iniciar cualquier experiencia se procede a realizar vacío de bomba mecánica para asegurarse que en el interior de la caldera sólo halla vapor de agua cuando se comienza a calentar. De esta forma se asegura la repetibilidad de las condiciones de ensayo para que sean siempre las mismas a lo largo de todas las experiencias.

Todas las experiencias consisten en fijar las condiciones de suministro de potencia térmica al evaporador, y las condiciones de extracción de calor del condensador. Una vez hecho esto, hay que esperar a que todo el sistema alcance el estado de equilibrio. En ese momento se efectúan las lecturas de potencia entregada y temperaturas, en el heat pipe y en el ambiente, respectivamente. Las lecturas se consideran válidas si las indicaciones se mantienen sin variación durante más de 30 minutos.

Determinación de pérdidas.

Para poder realizar estas experiencias se tapó el extremo A de la caldera, con un tapón de igual diámetro que el de la parte cilíndrica del heat pipe. De esta forma se efectuaron más de 40

mediciones, que insumían unas tres horas cada una. Con los resultados obtenidos se trazó la curva de pérdidas térmicas en función de la diferencia de temperatura entre el interior de la caldera y el ambiente, la cual se puede ver en la Fig. 4.

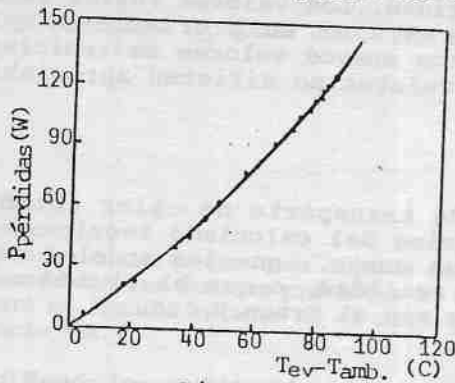


Fig. 4

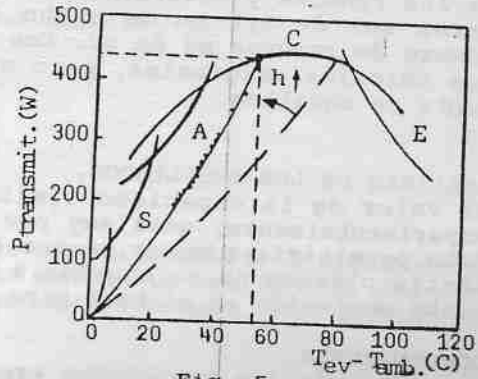


Fig. 5

Ensayo del heat pipe.

Con el procedimiento de medición explicado más arriba, se comienza la experiencia entregando al heat pipe una potencia térmica dada. Si se alcanza el equilibrio, se repite la experiencia en las mismas condiciones anteriores, pero incrementando la potencia en una cantidad dada. De volver a repetirse la situación de equilibrio anterior, pero esta vez a una potencia de conducción mayor, se repite la experiencia incrementando la potencia en pasos discretos, hasta alcanzar el punto en el cual la temperatura en el evaporador crece indefinidamente, mientras que la del condensador disminuye. En ese momento el heat pipe ha dejado de conducir, y ha llegado al límite de su capacidad de transporte de calor. Durante los múltiples ensayos realizados sólo se pudo determinar claramente un punto con estas características. En él, la potencia medida fué de 442 W (± 6 W), para una diferencia de temperatura entre el evaporador y el ambiente de 54 C ($\pm 1,7$ C). Este punto forma parte de la curva de la capacidad límite del heat pipe en función de la temperatura, cuyo aspecto debería ser el de la Fig. 5.

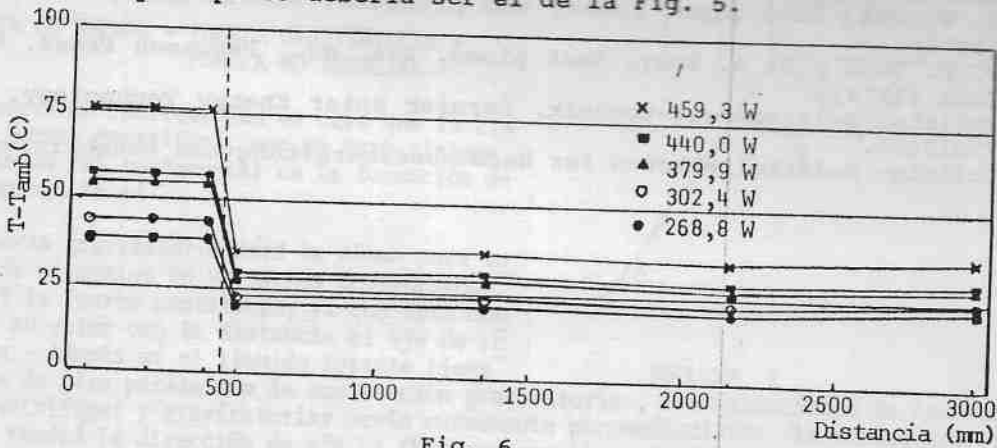


Fig. 6.

En la Fig. 6 se pueden ver los perfiles de temperatura a lo largo del heat pipe, para los diferentes regímenes de transporte de calor.

VERIFICACION DE LAS HIPOTESIS DE CALCULO.

Una vez finalizadas ambas series de ensayos, se cortó el heat pipe en un extremo, para efectuar la medición directa de las dimensiones de las ranuras y determinar su cantidad. Los valores reales resultaron ser de 0,6 mm de ancho, por 1,2 mm de profundidad, y el número de ranuras es de 50. Con estos nuevos valores se rehicieron los cálculos originales, pero sus valores no difieren apreciablemente de aquellos.

ANALISIS DE LOS RESULTADOS.

El valor de la capacidad límite de transporte de calor obtenido experimentalmente, está muy por encima del calculado teóricamente. Esto permitiría suponer, entre otras cosas, que los modelos de la teoría clásica no se ajustan a la realidad, o que el fluido realmente contenido en el heat pipe, no sea el Freon R 113.

CONCLUSIONES.

Considerando los resultados experimentales obtenidos, el heat pipe ensayado demuestra una gran capacidad de conducción de calor, que cubre las necesidades para las cuales está destinado.

Su mayor desventaja la constituye su gran inercia térmica, lo cual explicaría la lenta respuesta térmica evidenciada por el colector solar del que forma parte, cuando este fué ensayado en el banco de ensayo de colectores en la C.N.I.E., en San Miguel, Pcia. de Buenos Aires.

REFERENCIAS.

- J. H. Ambrose, L. C. Chow y J. E. Beam, An apparatus to measure the maximum heat transfer rate in heat pipes, *Journal of Heat Transfer, Transactions of the ASME*, Vol. 109, pag. 1023-1025, Nov. 1987.
- N. H. Bonadeo, Diseño y construcción de un aparato para la caracterización de un heat pipe, Trabajo de Laboratorio II, Univ. Bs. As.- C.N.E.A., Sept. 1992.
- T. P. Cotter, Theory of heat pipes, Los Alamos, Sci. Lab. Rep. LA-3246-MS (1965).
- S. W. Chi, Heat pipe. Theory and practice, McGraw-Hill, New York (1976).
- P. D. Dunn y D. A. Reay, Heat pipes, 2da. ed., Pergamon Press, New York (1978).
- Folleto: Solarenergie-technik. Dornier Solar Energy Technology, VA 77012000.
- Folleto: Solarkollektoren für Warmwasserbereitung und Hausheizung