

# HEAT PIPES EN ENERGIA SOLAR: UNA REVISION BIBLIOGRAFICA

D. Gómez\* y E. Mezzabolta\*

## RESUMEN

El "heat pipe" es un dispositivo sencillo y adaptable capaz de transportar grandes flujos de calor con bajos gradientes de temperatura.

A partir de su re-descubrimiento, en la década del 60, los "heat pipes" han encontrado un amplio espectro de aplicaciones. Se los han utilizado, entre otras, en áreas tales como recuperación y acumulación de energía, acondicionamiento de ambientes, enfriamiento de equipos electrónicos, control térmico en naves espaciales, reactores nucleares y colectores solares.

Esta revisión se ocupa de parte de la literatura concerniente a la relación heat pipes-energía solar. También incluye un panorama de los trabajos sobre principios básicos para el modelado, diseño, construcción y operación de heat pipes en general, como orientación para quienes enfrentan el tema por primera vez.

## INTRODUCCION

Generalmente, un "heat pipe" tiene forma tubular y está compuesto por tres elementos básicos. Un tubo sellado, una estructura capilar porosa y un fluido de transferencia térmica (o fluido de trabajo). En contacto con una fuente y un sumidero de calor, el fluido absorbe calor y se vaporiza en la zona caliente (evaporador), el vapor resultante circula a lo largo de la sección central del tubo (adiabática) y cuando alcanza la zona fría (condensador), libera la energía térmica transportada. El vapor se condensa al ceder calor y el líquido resultante retorna a la zona del evaporador a través de la estructura porosa por acción capilar (Fig. 1). En aplicaciones corrientes de energía solar, la estructura capilar suele estar dada por capas enrolladas de fina tela metálica o ranuras longitudinales hechas en la pared del tubo durante su manufactura.

---

\* Dpto. Fuente Renovables y U.R.E. - Comisión Nacional de Energía Atómica - Av. del Libertador 8250 - 1429 Buenos Aires.  
Trabajo llevado a cabo en cooperación con el Brace Research Institute-McGill University y financiado parcialmente por la Canadian International Development Agency.

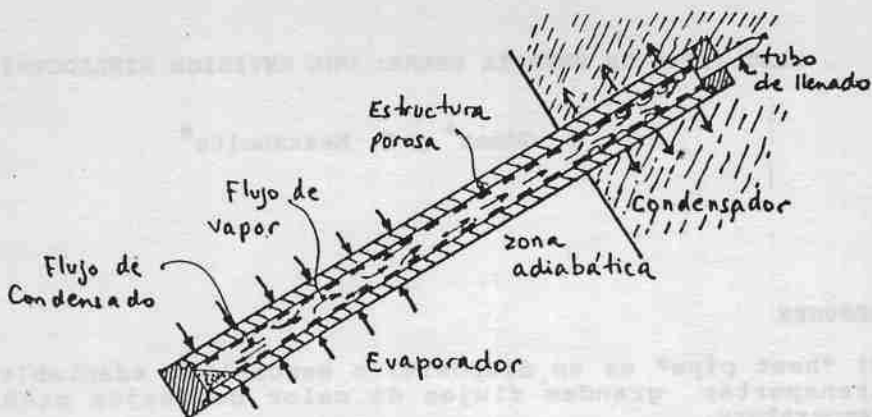


Fig. 1 - Heat pipe convencional: componentes y operación

El heat pipe es en muchos aspectos similar al termosifón. Si no se emplea estructura capilar y el condensado vuelve al evaporador por gravedad, el heat pipe resulta un termosifón cerrado de dos fases, que es llamado a veces heat pipe sin malla asistido por gravedad. Al carecer de partes móviles, no requerir energía externa para su funcionamiento, poseer una geometría sencilla y operar de manera silenciosa, ofrecen una gran versatilidad como para ser acoplados modularmente.

La idea de construir un dispositivo en el cual la transferencia de calor se logra por medio de la evaporación y condensación de un fluido de trabajo, al tiempo que se emplean fuerzas capilares para mover al líquido, fue propuesta por Gaugler<sup>1</sup> en 1942 para aplicaciones en refrigeración. Sin embargo, el "heat pipe" permaneció relativamente desconocido hasta fines de la década del 60 cuando las industrias nuclear y aeroespacial comenzaron a utilizarlo. Grover<sup>2,3</sup> y sus colaboradores fueron los primeros en introducir el término "heat pipe" en 1963. Ivanoskii et al.<sup>4</sup> sugirieron que un nombre más apropiado sería "heat transfer pipe", pero no lo adoptaron debido a la difusión del nombre original. Similar criterio se siguió en este trabajo al conservar el nombre inglés debido a su difusión y a cuan extrañas resultaban las posibles traducciones.

## 1.- PRINCIPIOS BASICOS

Para una revisión exhaustiva del tema desde una perspectiva global, se recomienda consultar los libros [4,8,9 y 10] y las actas de las Conferencias Internacionales sobre heat pipes (Stuttgart, 1973; Bologna, 1976; Palo Alto, 1978; Londres, 1981; Tsukuba, 1984).

El primer trabajo de fundamentación teórica sobre diseño y análisis de desempeño de heat pipes fue presentado por Cotter<sup>5</sup> en 1965. Debido a la complejidad de los fenómenos de transporte involucrados en la operación, los estudios teóricos continúan hasta la fecha, especialmente los que se ocupan de la operación en régimen transitorio<sup>11</sup> y de las características de heat pipes más novedosos<sup>12</sup>.

Si bien el heat pipe ofrece una conductancia térmica muy alta, existen límites en la transferencia de calor. Estos límites tienen su origen mayormente en la mecánica del fluido de trabajo cuya circulación continua es principalmente responsable de la operación apropiada<sup>4-10,13</sup> y muestran las limitaciones debidas al flujo de vapor (límite sónico), al flujo de líquido (límite de capilaridad), a las interacciones entre los flujos de líquido y vapor (límite de arrastre de vapor), y al cambio de fase en el evaporador (límite de ebullición).

El diseño implica la combinación óptima de fluido de trabajo, estructura capilar y tubo (o recipiente adecuado). El primer requisito para el fluido de trabajo es satisfacer el rango de temperatura de operación, luego sus propiedades termofísicas deben considerarse en relación con los cuatros límites de operación. Interesa que el calor latente de evaporación, la conductividad térmica del líquido y la tensión superficial sean comparativamente altas, mientras que las viscosidades de la fase vapor y líquido sean comparativamente bajas. La estructura capilar debe asegurar, primordialmente, el retorno del condensado. La selección del material del tubo depende de los siguientes criterios: alta conductividad térmica, facilidad de mojado y compatibilidad con el fluido, la malla y el medio ambiente. Dos cuestiones fundamentales de compatibilidad son la corrosión y la generación de gases no-condensables.

## 2.- APLICACIONES EN ENERGIA SOLAR

Los heat pipes no constituyen un tema específico en el campo de las energías renovables; han sido empleados frecuentemente en colectores solares y recientemente han encontrado aplicaciones en acumulación de energía, acondicionamiento de ambientes, enfriamiento nocturno y bombeo de agua. Debido a esta diversidad, la búsqueda bibliográfica cubre un área mucho más vasta de lo que abarca esta limitada revisión.

En general los colectores solares emplean heat pipes asistidos por gravedad para un rango de temperaturas de operación de  $-50^{\circ}\text{C}$  a  $200^{\circ}\text{C}$ <sup>14-44</sup>. Dos son los atractivos principales para el uso de heat pipes en estos equipos: el hecho de no presentar problemas de congelamiento y la posibilidad de actuar como diodos térmicos, evitando así la posibilidad de flujo inverso. El diseño específico del heat pipe para lograr la transferencia térmica desde el colector hasta el circuito primario de captación de calor, no ofrece mayores dificultades. La existencia de colectores comerciales que usan heat pipes<sup>34,41,42</sup> y los resultados obtenidos en los numerosos estudios de desempeño de prototipos<sup>14-16,20-21,23-25,27-28,35-39,43-45</sup> muestran la aplicabilidad de los heat pipes como dispositivos de transmisión de calor en colectores. Los problemas surgen en la adecuación de los heat pipes a las configuraciones complejas en el evaporador y en el condensador y se expresan en la forma "cómo combinar los heat pipes en el colector" y "cómo combinar todos los heat pipes en único condensador que debe colocarse dentro del tanque acumulador"<sup>14</sup>. Este último aspecto es el que todavía no ha sido resuelto con total eficacia, sobre todo en los colectores planos<sup>23</sup>. En los colectores de tubo evacuado, los heat pipes proveen el medio más elegante para la transmisión del calor desde

el colector hasta el fluido de captación. Además, mediante la elección apropiada del fluido de trabajo, se pueden evitar las desventajas de temperaturas excesivamente elevadas durante prolongados períodos sin uso<sup>41</sup>.

El uso de heat pipes para transferir calor desde y hacia materiales de acumulación de calor latente ha sido investigado<sup>49-50</sup> y se han construido prototipos modulares. Cada módulo contiene un heat pipe y consta de tres zonas: la región de la fuente de calor donde el fluido colector calienta un extremo del heat pipe, una región de acumulación que contiene el material de cambio de fase y aletas emergentes del heat pipe, y un sumidero de calor donde el fluido de conexión acumulador-carga circula por el otro extremo del heat pipe. El sistema puede operar en los modos colector a acumulador, acumulador a carga, o colector a carga<sup>50</sup>.

Aplicaciones en edificios abarcan, recuperación de calor en acondicionamiento de ambiente mediante intercambiadores de calor con haces de heat pipes<sup>54</sup>, sistemas de paneles calefactores<sup>53</sup>, almacenamiento de frío bajo tierra<sup>53</sup> y sistemas de pared Trombe<sup>52,53</sup>.

Un reactor químico para el reformado de metano, integrado a un receptor constituido por un complejo heat pipe de sodio ha sido construido y probado y constituye el uso más avanzado de la tecnología de heat pipes en energía solar<sup>57,58</sup>.

Un enfriador que opera por pérdida de calor al cielo nocturno mediante emisión infrarroja ha sido construido y probado<sup>54</sup>. El sistema de enfriamiento consiste de una recipiente aislado conectado a un radiador/emisor por medio de un heat pipe. El heat pipe, diseñado para actuar como diodo térmico, conduce calor del receptáculo aislado hacia el radiador sólo bajo condiciones de cielo nocturno claro.

Las propuestas de usar heat pipes involucrados en ciclos termodinámicos<sup>48</sup>, conectando un receptor plano-cóncavo colocado en el foco de un concentrador del tipo paraboloide de revolución a una máquina térmica<sup>46,47</sup> y para bombear agua mediante evaporación-condensación<sup>56</sup> son sólo estudios teóricos cuya concreción se ha visto materializada.

Finalmente, en la literatura de Energías Renovables aparecen algunos estudios de desempeño de heat pipes aislados<sup>59-63</sup> de características y desempeños aptos para aplicaciones en energía solar. La referencia [64] es un valioso compendio de estudios de patentes, aplicaciones de patentes y de literatura técnica y científica publicada en los Estados Unidos, Japón, Gran Bretaña, Alemania y Francia durante el período 1975 a 1985 sobre heat pipes en los más variados campos de aplicación, incluido el de energía solar.

#### AGRADECIMIENTOS

La mayor parte de la bibliografía concerniente a las aplicaciones en energía solar fue recopilada en la importante colección sobre Energías Renovables de la biblioteca del Brace Research Institute. Los autores agradecen el apoyo y la asistencia brindados por todo el personal del mismo.

## REFERENCIAS

### INTRODUCCION

1. R. S. Gaugler, Heat transfer device, Patente US No. 2350348 (1944).
2. G. M. Grover, Evaporation-condensation heat transfer device, Patente US No. 3229759 (1963).
3. G. M. Grover, T. P. Cotter y G. F. Erickson, Structures of very high thermal conductance, *J. Appl. Phys.*, **35**, 1990 (1964).
4. M. N. Ivanovskii, V. P. Sorokin, I. V. Yagodkin, *The Physical principles of heat pipes*, Clarendon Press, Oxford (1982).

### PRINCIPIOS BASICOS

5. C. A. Busse, Theory of ultimate heat transfer limit of cylindrical heat pipes, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **16**, pp. 169-186 (1973).
6. C. A. Busse y J. E. Kemme, Dry-out phenomena in gravity-assist heat pipes with capillary flow, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **23**, pp. 643-654 (1980).
7. T. P. Cotter, Theory of heat pipes, Los Alamos Sci. Lab. Rep. LA-3246-MS (1965).
8. S. W. Chi, Heat pipe theory and practice, McGraw-Hill, New York (1976).
9. D. Chisolm, The heat pipe, Mills & Boom, Londres (1971).
10. P. D. Dunn y D. A. Reay, Heat pipes, 2da ed., Pergamon Press, New York (1978).
11. M. L. Hall y J. M. Doster, A sensitivity study of the effects of evaporation/condensation accommodation coefficients on transient heat pipe modeling, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **33**, pp. 465-481 (1990).
12. S. Seshan y D. Vijayalakshmi, Heat pipes-concepts, materials and applications, *Energy Convers. Mgmt.*, **26**, 1, pp. 1-9 (1986).
13. C. L. Tien, Heat Pipes, en W. H. Rohsenow, J. P. Hartnet y E. N. Ganic, *Handbook of heat transfer applications*, 2da ed., McGraw-Hill (1985), Capitulo 5.

### APLICACIONES EN ENERGIA SOLAR:

#### COLECTORES PLANOS

14. M. Akyurt, Development of heat pipes for solar water heaters, *Sol. En.*, **32**, 5, pp. 625-631 (1984).
15. R. Bairamov y K. Toilev, Heat pipe in solar collectors, *Adv. in Heat Pipe Technol.*, D.A. Reay (Ed.), Pergamon Press (1981).
16. J. Che, S. Chang y J. Chang, The research on FP collector with heat pipe. *Proc. Int. Symposium on Thermal Application of Solar Energy*, Hakone, Japon (1985).
17. Z. Chen, A solar water heater with a separative heat pipe. Clean and Safe Forever, *Book of Abstracts of the 1989 Congress of the ISES*, Kobe, Japon (1989).
18. H. F. W. de Vries, W. Kamminga y J. C. Francken, Fluid circulation control in conventional and heat pipe planar solar collectors, *Sol. En.*, **24**, pp. 209-213 (1980).
19. A. Ecevit y T. Fakioglu, The usage of heat pipes in solar energy, *Proc. of the Izmir Int. Symposium-II on Sol. En. Fundamentals and Applications*, Izmir, Turquia (1979).

20. R. E. Evans y D. N. Greeley, The analysis, design and thermal performance of a heat pipe flat plate collector, Proc. Congress of the ISES (1977).
21. J. C. Francken, The heat pipe fin, a novel design of a planar collector, Proc. of the ISES Congress (1975).
22. J. R. Hull, Analysis of heat transfer factors for a heat pipe absorber array connected to a common manifold, J. Sol. En. Engng., 108, pp. 11-16 (1986).
23. J. R. Hull, Comparison of heat transfer in solar collectors with heat-pipe versus flow-through absorbers, J. Sol. En. Engng., 109, pp. 253-258 (1987).
24. K. A. R. Ismail, y M. M. Abogderah, Thermal and numerical analysis of a heat pipe solar collector, Proc. 2nd World Energy Congress, Reading, Reino Unido (1992).
25. C. Ives, W. Wight y A. Andraos, Development of heat pipe solar D.H.W. Systems, INTERSOL 85, Proc. 9th Biennial Congress of the ISES, Montréal, Canadá (1985).
26. J. LeNormand, Short guide for simple heat pipe design, Brace Research Institute-McGill Univ., Informe T.135, Montréal, Canadá (1982).
27. J. LeNormand, A. Andraos y F. Milz, Experiences with heat pipe batch solar collectors. INTERSOL 85, Proc. 9th Biennial Congress of the ISES, Montréal, Canadá (1985).
28. J. LeNormand, W. Coffin y T. A. Lawand, Development and testing of low cost heat pipe solar collectors for process and domestic hot water applications, Brace Research Institute-McGill Univ., Inf. I.183, Montréal, Canadá (1982).
29. F. H. Rice, A unique solar heat pipe system for space and water heating, Proc. of the ISES Congress (1979).
30. C. K. Rush, S. P. Lapp y W. J. Spaulding, Two-phase thermosiphons for solar engineering applications, INTERSOL 85, Proc. 9th Biennial Congress of the ISES, Montréal, Canadá (1985).
31. G. Singh y R. G. Tathgir, Heat pipe for solar appliances. Solar India - 82, Proc. of the Solar Energy Society of India National Convention, New Dehli, India (1982).
32. M. Turney y M. Levesque, How to build a heat pipe solar collector, Brace Research Institute-McGill Univ., Informe T.163, Montréal, Canadá (1986).
33. H. Y. Wang, H. F. Fan, B. B. Xing y Y. L. Wang, Optimization of parameters for solar plane-plate collector with gravity heat pipes, Proc. Int. Symp. on Thermal Application of Solar Energy, Hakone, Japón (1985).

#### COLECTORES DE TUBO EVACUADO Y CPC

34. S. T. Bushby, The performance of an evacuated tube heat-pipe collector system in Brisbane, Australia, INTERSOL 85, Proc. 9th Biennial Congress of the ISES, Montréal, Canadá (1985).
35. M. Collares Pereira y F. Mendes, A heat pipe optimization for a CPC application, Clean and Safe Forever, Proc. Congress of the ISES, Kobe, Japón (1989).
36. M. Collares Pereira y F. Mendes, O. Brost, M. Groll, y S. Roesler, Optimized heat pipe for application in integrated CPCs., Proc. of the Biennial Congress of the ISES, Denver, E.E.U.U. (1991).
37. J. D. Garrison, A glass, evacuated, solar collector panel using approximately ideal concentration and selective

- absorption, INTERSOL 85, Proc. 9th Biennial Congress of the ISES, Montréal, Canadá (1985).
38. J. D. Garrison, An integrated solar thermal collector system using an evacuated glass solar collector and heat pipe transfer to storage, ASES'86, Proc. of the 1986 Annual Meeting, Boulder, E.E.U.U. (1986).
  39. P. Hosatte y N. Vallières, Solar space heating in the north of Canada. Presentation of a prototype technical shelter heated by heat pipe evacuated tube solar collectors, installed at LG2, James Bay, Proc. of 17th An. Conf. of the Sol. En. Soc. of Canada, Toronto, Canadá (1991).
  40. W. Kamminga, The testing of an evacuated tubular collector with a heat pipe under transient conditions. INTERSOL 85, Proc. 9th Bien. Congr. of the ISES, Montréal, Canadá (1985).
  41. F. Mahdjuri, Evacuated heat pipe solar collector, Energy Convers., 19, pp. 85-90 (1979).
  42. F. Mahdjuri, Tubular evacuated heat pipe solar collector. Energex'82, Proc. Conference on Energy Self-Reliance: Conservation, Production & Consumption, Regina, Canadá (1982).
  43. U. Ortobassi y W. M. Buehl, An internal cusp reflector for an evacuated tubular heat pipe solar collector, Proc. Congress of the ISES (1977).
  44. U. Ortobassi y F. P. Fehlner, Cusp mirror-heat pipe evacuated tubular solar thermal collector, Sol. En., 24, pp. 477-489 (1980).
  45. J. Ribot y R. D. McConnell, Testing and analysis of a heat pipe solar collector, J. Sol. En. Engng., 105, pp. 440-445 (1983).

#### CICLO TERMODINAMICO Y MAQUINAS TERMICAS

46. Y. A. M. Elgendy, Analysis of a plano-concave heat pipe receiver, Proc. of the Biennial Congress of the ISES, Denver, E.E.U.U. (1991).
47. S. M. Jeter y Y. A. M. Elgendy, Simulation of a dish Ericsson solar thermal power system with heat pipe receiver, Proc. of the 1989 Annual Conference, Denver, E.E.U.U. (1989).
48. Y. Kobayashi, Heat pipe thermodynamic cycle and its applications. J. Sol. En. Engng., 107, pp. 153-159 (1985).

#### ACUMULACION DE ENERGIA

49. A. Abhat, Performance studies of a finned heat pipe latent thermal energy storage system, Proc. Congr. of ISES (1977).
50. R. L. Cole, Heat transfer via heat pipes. Solar Heat Storage: Latent Heat Materials, Vol. II: Technology, G.A. Lane (Ed.), CRC Press, Boca Raton, Florida, E.E.U.U., Capitulo 4: Testing Latent-Heat Storage Devices (1985).
51. S. M. Hasnain y B. M. Gibbs, Experimental investigation of heat transfer in a heat pipe exchanger for heat storage applications. Clean and Safe Forever, Proc. of the 1989 Congress of the ISES, Kobe, Japón (1989).

#### EDIFICIOS

52. J. M. Corliss, G. H. Stickford, T. A. Klausning, F. E. Jakob y C. Y. Liu, An analytical evaluation of heat pipe augmented passive solar heating systems, Passive Solar - State of the

Art, Vol. 1 (1978).

53. H. Muramoto, K. Fukui, S. Saito, S. Kamio y S. Tasaki, Studies on heat transfer systems using heat pipes. Proc. Int. Symp. on Thermal App. of Sol. En., Hakone, Japón (1985).
54. K. G. Sheinkopf, An overview of the buildings research program at the Florida Solar Energy Center. Proc. 12th Passive Solar Conference, Portland, E.E.U.U. (1987).

#### ENFRIAMIENTO NOCTURNO

55. J. LeNormand, Thermal diode nocturnal cooler, INTERSOL 85, Proc. of the 9th Biennial Congress of the International Solar Energy Society, Montréal, Canadá (1985).

#### BOMBEO DE AGUA

56. A. H. Saghati, A new concept on design of solar water-pumping through open heat pipe, Proc. of the Biennial Congress of the ISES, Denver, E.E.U.U. (1991).

#### REACTORES Y HEAT PIPES QUIMICOS

57. R. Diver, J. Fish, R. Levitan, M. Levy, E. Meirovitch, H. Rosin, S. Paripatyadar y J. Richardson, Solar test of an integrated sodium reflux heat pipe receiver/reactor for thermochemical energy transport, Sol. En., 48, 1, pp.21-30 (1992).
58. M. Levy, R. Levitan, E. Meirovitch, A. Segal, H. Rosin y R. Rubin, Chemical reactions in a solar furnace 2: direct heating of a vertical reactor in an insulated receiver. Experiments and computer simulations, Sol. En., 48, 6, pp. 395-402 (1992).

#### DESEMPEÑO DE HEAT PIPES

59. A. C. Gurses y C. Cannistraro, The inclination effect on the performance of water-filled heat pipes, Renewable Energy, 1, No. 5/6, pp. 667-674 (1991).
60. H. Külünk, Experiences with electrically activated heat pipe. Proc. of ASES 1990 An. Conference, Austin, E.E.U.U. (1990).
61. A. V. Spyridonos, Etude experimentale d'un caloduc avec substance poreuse active. Revue de Physique Appliquée, 12, pp.439-446 (1977).
62. A. V. Spyridonos, Experimental study of a heat pipe with an active porous medium, Proc. of Int. Conf. on Alternative Energy Sources, Miami, E.E.U.U. (1977).
63. R. G. Tathgir y G. Singh, Study of a stainless steel grooved water heat pipe, Proc. of the Sol. En. Soc. of India National Convention, New Dehli, India (1982).

#### PATENTES

64. M. Terpstra y J. G. Van Veen (Eds.), Heat pipes: construction and application. A Study of Patents and Patent Applications, Elsevier, New York (1987).