

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v4i1.460>

Diseño de un caloducto axialmente ranurado y sus modelos matemáticos

Design of an axially grooved heat pipe and its mathematical models

Gerardo Galindo Ramos

Tecnológico Nacional de México Campus Acapulco
gerardo.gr@acapulco.tecnm.mx
<https://orcid.org/0000-0002-3268-2857>
México

Beatriz G. Salmerón

Tecnológico Nacional de México Campus Acapulco
beatriz.gs@acapulco.tecnm.mx
<https://orcid.org/0000-0001-6785-1342>
México

Nyx Anaid V. Sotomayor

Tecnológico Nacional de México Campus Acapulco
nyx.vs@acapulco.tecnm.mx
<https://orcid.org/0000-0003-2295-6567>
Acapulco-México

Artículo recibido: 1 de marzo de 2023. Aceptado para publicación: 07 de marzo de 2023.
Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

Resumen

El término “caloducto” (heat pipe) describe a “una estructura de ingeniería que posee una elevada conductividad térmica que excede a cualquiera de los metales conocidos”. Los caloductos utilizan alguna especie de material poroso o estructura capilar que asiste o promueve el flujo de un fluido desde uno de sus extremos que funciona como condensador hasta el extremo opuesto que funciona como evaporador. Dicha estructura capilar forma parte esencial de estos dispositivos de transferencia de calor de dos fases, pasivos, que son capaces de transferir grandes cantidades de calor, sin pérdida de este, y que pueden funcionar con bajos gradientes de temperatura. Durante la operación en estado estacionario de un caloducto, se pueden presentar importantes mecanismos que limitan la cantidad máxima de calor que puede transferir y por tanto afectan su funcionamiento. Los límites de funcionamiento representan los límites máximos de transporte de calor. Existen cinco tipos de limitaciones al transporte de calor: límite viscoso, límite sónico, límite de arrastre y límite de ebullición. La magnitud de estas limitaciones depende de las propiedades de los fluidos de trabajo, del material y dimensiones del caloducto. El alcance de cualquiera de estos valores límites daría por resultado una mala y/o nula operación del caloducto por lo que debe observarse trabajar por debajo de estos valores y que a través de modelos matemáticos podemos conocer. Las ecuaciones de análisis en el presente trabajo nos permiten visualizar los máximos valores de calor que un caloducto, bajo determinadas condiciones termodinámicas y geometrías, puede transferir.

Palabras clave: caloducto, límites, modelos, calor, diseño

Abstract

The term "heat pipeline" (heat pipe) describes "an engineering structure that possesses a high thermal conductivity that exceeds any of the known metals." Heat pipes use some kind of porous material or capillary structure that assists or promotes the flow of a fluid from one of its ends that works as a condenser to the opposite end that works as an evaporator. Said capillary structure forms an essential part of these passive, two-phase heat transfer devices, which are capable of transferring large amounts of heat, without loss of heat, and which can operate with low temperature gradients. During the steady state operation of a heat pipe, important mechanisms can arise that limit the maximum amount of heat that can be transferred and therefore affect its operation. The operating limits represent the maximum limits of heat transport. There are five types of heat transport limitations: viscous limit, sonic limit, drag limit, and boiling limit. The magnitude of these limitations depends on the properties of the working fluids, the material and dimensions of the heat pipe. The reach of any of these limit values would result in a bad and/or non-existent operation of the heat pipe, so it must be observed that work is below these values and that we can know through mathematical models. The analysis equations in the present work allow us to visualize the maximum heat values that a heat pipe, under certain thermodynamic conditions and geometries, can transfer.

Keywords: heat pipe, limits, models, heat, design

Todo el contenido de LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, publicados en este sitio está disponibles bajo Licencia Creative Commons .



Como citar: Galindo Ramos, G., Salmerón, B., & Sotomayor, N. A. (2023). Diseño de un caloducto axialmente ranurado y sus modelos matemáticos. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades* 4(1), 2865–2881. <https://doi.org/10.56712/latam.v4i1.460>

INTRODUCCIÓN

El contar con tecnología en sistemas de intercambio de calor de alta eficiencia, simples, compactos, capaces de incrementar energía adicional a los procesos que lo requieran y que, además, permitan aprovechar y utilizar la energía de desecho, es una necesidad que lleva a trabajar con nuevos dispositivos recuperadores de calor llamados “caloductos”.

El caloducto es un dispositivo con una eficiencia de transporte de calor muy alta, de aparente fácil construcción, que en la actualidad no es muy utilizado en nuestro país y que requiere de un mayor y profundo estudio en lo que a su diseño, fabricación y comportamiento se refiere con la finalidad de que sean reconocidos su potencialidad y diversidad de aplicaciones. (Galindo, 2003)

Los límites viscoso y capilar de la estructura se relacionan con las pérdidas de presión que ocurren en las fases del líquido y vapor respectivamente. El límite sónico se presenta en el momento que existe una obstrucción al flujo de vapor, mientras que el límite de arrastre se presenta cuando se tienen elevados esfuerzos de corte líquido-vapor desarrollados en la fase de vapor que transita en contracorriente a través de la estructura capilar saturada de líquido.

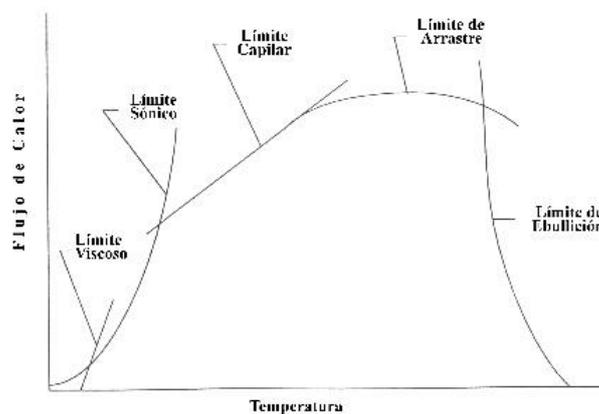
Estos límites constituyen límites axiales al flujo del calor; es decir, están en función de la capacidad de transporte de calor a lo largo del caloducto.

El límite de ebullición, es un límite para el flujo de calor de forma “radial” y se alcanza cuando el flujo de calor aplicado en la zona del evaporador es tan alto que dentro de la estructura capilar de la misma zona ocurre la ebullición nucleada. Esto origina burbujas de vapor que bloquean parcialmente el retorno del fluido y pueden por último llevar al secado prematuro del evaporador.

El efecto de los límites de transporte de calor se puede observar en la Figura 1. Al diseñar un caloducto este debe encontrarse por debajo de la línea continua, de lo contrario, no operaría por encontrarse en una “zona de bloque”. (Dunn, 1994)

Figura 1

Áreas de funcionamiento y bloqueo de un caloducto



Nota: Adaptado de Heat Pipes, Dunn, P. D., & Reay, D. A., 1994, Pergamon Press Ltd.

Principio de funcionamiento de los Caloductos

Al caloducto se le ha definido en más de una forma, dependiendo de sus propiedades, de su estructura o su función, pero todas estas concepciones, finalmente, describen un dispositivo de enorme aplicación fundamentado en su principio básico de funcionamiento; el ciclo de evaporación-condensación de su fluido de trabajo.

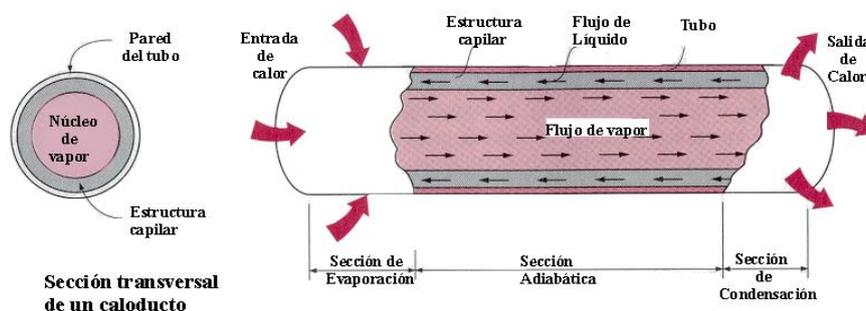
Al caloducto se le considera como un recipiente al vacío, herméticamente sellado, que tiene la particularidad de llenarse a un nivel con un fluido apropiado (fluido de trabajo) el cual sirve como medio de transferencia de calor. De esta manera se obtiene un dispositivo utilizado para transportar calor desde un lugar a otro por medio de la evaporación y subsecuente condensación del fluido de trabajo, en el que su circulación es garantizada por fuerzas capilares.

Básicamente, este tubo sellado posee esta estructura capilar forrando la superficie interna que actúa como una bomba pasiva, haciendo circular el condensado dentro del caloducto, mediante la acción capilar, de una pequeña cantidad del fluido introducido como líquido que se satura una vez que se inyecta al dispositivo.

Los caloductos constan de tres secciones bien definidas: la sección del evaporador, en un extremo, donde el calor se absorbe y el fluido se vaporiza, la sección del condensador en el otro extremo, donde el vapor es condensado y el calor eliminado y la sección adiabática (la cual puede no existir) en medio, donde las fases de vapor y líquido del fluido fluyen en direcciones opuestas a lo largo del centro del tubo y de la estructura capilar respectivamente, Figura 2.

Figura 2

Secciones y flujos dentro de un caloducto



Nota: Adaptado de Heat Transfer: a practical approach, Cengel, Yunus., A., 1998, WCB/McGraw Hill

El agua constituye uno de los fluidos más utilizados en caloductos para intervalos de temperatura moderados gracias a sus particulares propiedades termodinámicas, su fácil adquisición y bajo costo; el agua, como cualquier otro fluido, experimentará un proceso de cambio de fase a una temperatura específica únicamente si su presión es igual a su presión de saturación a esta temperatura. (Cengel, 1998)

Esto es, un caloducto con agua como fluido de trabajo diseñado para remover calor a 70 °C, deberá mantener una presión interna de 31.19 kPa (0.3078 atm), la cual es la presión de ebullición del agua a esta temperatura.

Cuando se aplica calor, se evapora el fluido de trabajo dentro del área donde se aplica. El vapor generado es ligeramente mayor en su temperatura que aquél que se encuentra en otras regiones del caloducto y, por tanto, se encuentra a una presión local más alta. Como resultado de este gradiente de presión, el vapor fluye a las regiones frías del caloducto donde se condensa.

El condensado retorna, entonces, a la región de evaporación a través de la estructura capilar. Este modo de transferencia de calor en dos fases provee al caloducto con una conductividad térmica efectiva muy elevada.

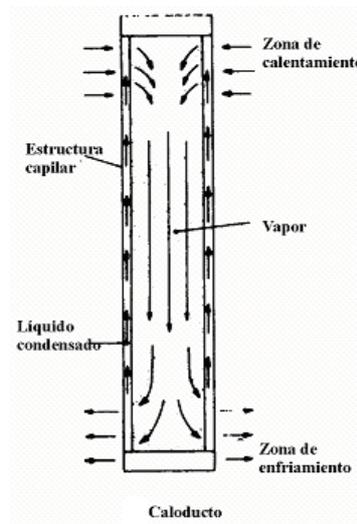
Un caloducto simple con agua como fluido de trabajo posee una conductividad térmica efectiva del orden de $100,000 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ que, comparado con los $400 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ del cobre, es 250 veces mayor. Puede incluso, bajo determinadas condiciones presentar una conductividad térmica efectiva de $400,000 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, lo cual es 1000 veces mayor que la del cobre.

La capacidad del caloducto para transportar calor a distancias apreciables sin necesidad de fuerzas externas para hacer circular el fluido que transfiere el calor es una de sus más útiles propiedades. (Silvestein, 1994)

Los caloductos utilizan alguna clase de estructura capilar para promover el flujo del líquido desde el condensador hacia el evaporador lo que permite que puedan ser utilizados en forma horizontal, en condiciones de microgravedad, o hasta en aplicaciones donde la estructura capilar deberá bombear el líquido en contra de la gravedad desde el condensador al evaporador, Figura 3.

Figura 3

Caloducto en condiciones de microgravedad



Nota. Adaptado de Heat Pipes, Dunn, P. D., & Reay, D. A., 1994, Pergamon Press Ltd.

Los fluidos de trabajo que se usan en los caloductos tienen una entalpía de vaporización elevada. Por lo tanto, un pequeño flujo de vapor a través del tubo puede transportar una gran cantidad de energía térmica.

Además de una elevada entalpía de evaporación, otras propiedades que conviene que tenga el fluido de trabajo incluyen una gran tensión superficial y una viscosidad baja a fin de mejorar el bombeo por capilaridad en el interior de la estructura capilar, así como una alta conductividad térmica en el estado líquido para reducir las caídas de temperatura en el evaporador y el condensador. (Dunn, 1994)

Aplicación de los Caloductos

Los caloductos son particularmente útiles en equipos de conservación de la energía en los que se quiere recuperar calor de los gases calientes para aplicaciones de precalentamiento de aire o de calentamiento suplementario. En algunos casos, el caloducto puede sustituir a combinaciones más caras de bombas, tuberías y configuraciones de doble cambiador de calor.

Los caloductos han sido y continúan siendo estudiados para una amplia variedad de aplicaciones, cubren el más amplio espectro de temperaturas encontradas en los procesos de transferencia de calor.

Las aplicaciones de los caloductos abarcan desde el uso de caloductos de helio líquido utilizados en el enfriamiento de aceleradores de partículas hasta el enfriamiento de reactores nucleares y el desarrollo potencial dirigido a la obtención de nuevas técnicas de medición para el rango de temperaturas de 2000-3000 °C. (Holman, 1998)

En muchas aplicaciones, donde se requiere el enfriamiento de un componente, puede ser inconveniente o térmicamente indeseable disipar calor mediante aletas o radiadores adjuntos al componente.

La temperatura de una superficie, está vinculada con la separación entre la fuente y el sumidero. Como el caloducto, por su naturaleza, tiende a operar a temperatura uniforme, este puede ser utilizado para reducir los gradientes térmicos entre las áreas desigualmente calentadas de un cuerpo.

Este es el caso de los satélites espaciales, con una sección de su superficie de frente al sol, y la sección de refrigeración a la sombra. Mediante un arreglo de sus componentes electrónicos internos montados sobre caloductos originaría un retorno de calor, creándose así compensación de temperatura.

La transformación del flujo de calor tiene su principal aplicación en la tecnología de reactores; en termoiónica, por ejemplo, para la transformación de un comparativamente bajo flujo de calor, generado por isótopos radiactivos, en flujo de calor suficientemente elevado capaz de ser utilizado eficientemente en generadores termoiónicos. (Dunn, 1994)

Un área más de aplicación lo constituye el control de la temperatura, el transporte de calor al exterior se lleva cabo de mejor manera utilizando caloductos de conductancia variable.

Pueden ser utilizados para controlar de forma precisa la temperatura de dispositivos montados sobre la sección del evaporador.

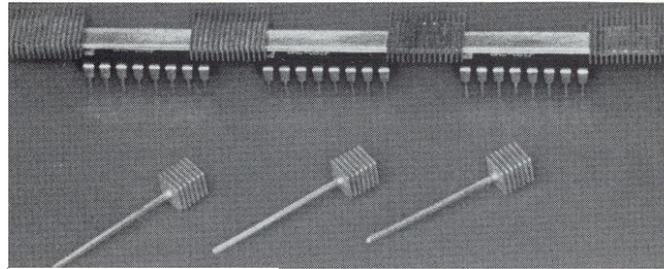
Como cualquier otro dispositivo, el caloducto deberá cumplir ciertos criterios antes de que pueda ser ampliamente aceptado en aplicaciones industriales. Debe ser confiable y seguro, funcional para lo que es requerido, de bajo costo, fácil de instalar y remover.

Los caloductos tienen una gran diversidad de aplicaciones, de entre las cuales se pueden citar:

- Troqueles de fundición y moldes de inyección.
- Conservación de energía.
- Fusión y descongelación de nieve.
- Calibración de termómetros.
- Enfriamiento de componentes electrónicos, Figura 4.
- Aeroespacial.

Figura 4

Enfriamiento de componentes microelectrónicos utilizandomicro-caloductos



Nota. Adaptado de Heat Pipes, Dunn, P. D., & Reay, D. A., 1994, Pergamon Press Ltd.

La NASA ha desarrollado nueva generación de caloductos, en los cuales se omite la estructura capilar:

Caloductos rotatorios. (Silvestein, 1992)

Caloductos VCHP's (Variable conductance heat pipes).

Caloductos LHP (Loop heat pipe).

Caloductos ranurados:

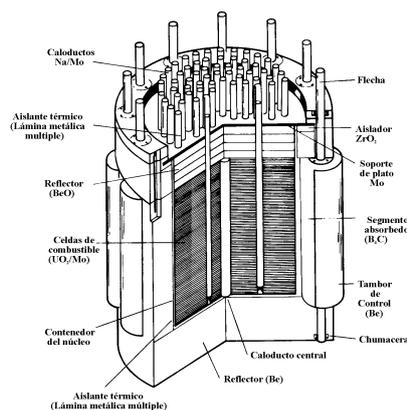
AGHP's (Axially Grooved heat pipe).

HGHP (Helically-grooved heat pipe). (Castle, 2000)

Todos estos tipos de caloductos son usados, o propuestos, hoy en día en naves espaciales y misiles incluyendo satélites de energía solar, el transbordador espacial, el laboratorio espacial y en los misiles Trident. Un caso, El SPAR, diseñado para utilizar la alta temperatura del reactor nuclear y proveer calor a un sistema de conversión de energía termoeléctrica, para generar energía eléctrica Figura 5. Posee caloductos de sodio/molibdeno en el núcleo termoeléctrico del reactor convertidor del calor transferido, unidades de potasio/niobio para unir el sistema de conversión al radiador y caloductos de potasio/titanio para distribuir el calor rechazado a través de la superficie del radiador. (Girrens, 1982)

Figura 5

El SPAR y la disposición de capas mostrando el núcleo del reactor y sus caloductos sodio/molibdeno



Nota. Adaptado de Heat Pipes, Dunn, P. D., & Reay, D. A., 1994, Pergamon Press Ltd.

El desarrollo de caloductos de peso ligero, para elevadas temperaturas, seguridad, y una eficiente transferencia de calor es la prioridad dentro de muchos más proyectos que conllevan al diseño, mejoramiento y puesta en marcha de grandes instalaciones en base a estos dispositivos. (Dunn, 1994)

Límite viscoso

A muy bajas temperaturas de operación, la diferencia de presión de vapor entre las regiones del evaporador y el condensador de un caloducto puede ser extremadamente pequeña. En algunos casos, las fuerzas viscosas dentro de la región de vapor pueden ser mucho más grandes que los gradientes de presión causados por la temperatura de trabajo local impuesta.

Cuando esto ocurre, los gradientes de presión dentro de la región de vapor pueden no ser suficiente para generar flujo y por tanto ocasionar el estancamiento del vapor. Esta falta de flujo o condición de flujo lento del vapor de un caloducto se le conoce como limitación viscosa.

El límite viscoso se observa frecuentemente en caloductos criogénicos y en caloductos con regiones de condensador extremadamente largo, entre otros.

El modelo bidimensional para el flujo de vapor que nos permite el cálculo del límite viscoso para la mayoría de los caloductos, considerando al vapor como un gas ideal isotérmico y donde los efectos inerciales son dominantes está dado por:

$$Q_{\text{viscoso}} = \frac{A_v r_v^2 h_{fg} \rho_v P_v}{16 \mu_v L_c}$$

La manera más fácil de evitar las limitaciones viscosas encontradas durante el inicio de operación se logra incrementando el flujo de calor aplicado al evaporador puesto que es a bajas temperaturas que las fuerzas viscosas predominan en el flujo de vapor a través del caloducto. (Peterson, 1994)

Límite sónico

En una tobera convergente un gas compresible se acelera hasta la velocidad del sónico debido al cambio de área. En un caloducto el vapor puede acelerarse hasta la velocidad del sonido al incrementarse la cantidad masa en el evaporador obstruyendo el paso y dando así lugar a una limitación sónica para el transporte axial de calor por unidad de área de la sección transversal del núcleo.

Contrariamente a los demás límites de transporte de calor, la limitación sónica actualmente sirve como el límite más elevado a la capacidad de transporte axial de calor y no necesariamente resulta en un secado de la estructura capilar en el evaporador o la falla total del caloducto. (Peterson, 1994)

La limitación axial sónica del flujo de calor en un caloducto está dada por la siguiente expresión,

$$Q_{\text{sónico}} = MA_v h_{fg} (\rho_v P_v)^{0.5}$$

Una relación para el cálculo del límite sónico, en función de las propiedades termofísicas, tiene la forma:

$$Q_{\text{sónico}} = \pi r_v^2 L_{\text{eff}} h_{fg} \left(\frac{\rho_v P_v}{A_v} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{P_t}{P_v} \left(1 - \frac{P_t}{P_v} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

Límite de arrastre

En la operación de caloductos, el líquido y el vapor fluyen en direcciones opuestas. La interacción entre el líquido y flujo de vapor en contracorriente y las fuerzas de corte viscosos que ocurren en la interfase líquido-vapor pueden inhibir el retorno de líquido al evaporador.

En los casos más drásticos, se pueden formar ondas y los esfuerzos de corte en la interfaz pueden ser más grandes que las fuerzas de tensión superficial del líquido, dando como resultado gotas de líquido atrapadas o arrastradas en el flujo de vapor y llevadas al condensador. Este arrastre de gotas de líquido, el cual puede limitar el flujo axial de calor, se le conoce como el límite de arrastre.

Cuando el arrastre es intenso, las gotas que inciden sobre el extremo del condensador pueden producir un sonido audible. (Klasing, s.f.)

El cociente del flujo de la cantidad de movimiento por unidad de área del vapor y las fuerzas de tensión superficial que actúan sobre el líquido es proporcional al Número de Weber,

$$W_E = \frac{\rho_v V_v^2 L}{\sigma}$$

el cual, para prevenir el arrastre de gotas de líquido por el flujo de vapor, deberá ser menor que la unidad; finalmente para el cálculo de la máxima capacidad de transporte por arrastre:

$$Q_{\text{arrastre}} = A_v h_{fg} \left(\frac{\sigma_l \rho_v}{2r_{h,w}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Límite de ebullición

No resulta conveniente que se formen burbujas en el relleno de un evaporador porque esto puede producir zonas calientes que obstruyan el flujo del líquido.

La formación de burbujas (nucleación) dentro de la estructura capilar de un caloducto afecta adversamente su funcionamiento y rendimiento. El crecimiento y movimiento de burbujas dentro de la estructura capilar puede cerrar la vía de retorno del líquido, causando el secado del evaporador.

El límite de ebullición se tiene desde el inicio mismo de la ebullición nucleada dentro de la estructura capilar. Las condiciones de ebullición representan una máxima velocidad de transferencia de calor. (Klasing, s.f.)

La expresión que permite, en función de las propiedades del fluido, determinar el límite de ebullición:

$$Q_{\text{ebull}} = \left(\frac{2\pi L_{\text{eff}} k_{\text{eff}} T_v}{h_{fg} \rho_v \ln \left(\frac{r_i}{r_v} \right)} \right) \left(\frac{2\sigma_l - \Delta P_{c,m}}{r_{\text{nuc}}} \right)$$

Límite capilar

La evaporación en la sección del evaporador de un caloducto origina que el menisco retroceda en el interior de la estructura capilar y la condensación en el condensador causa inundamiento.

El efecto combinado de esta evaporación y condensación, Figura 6a, resulta en un menisco con radio de curvatura que varía a lo largo de la longitud axial del caloducto. El punto en el cual el

menisco tendrá un mínimo radio de curvatura se denominado como el punto de “seco” y usualmente ocurre en el evaporador en el punto más alejado de la región del condensador.

El punto húmedo ocurre en aquel punto donde la presión de vapor y la presión del líquido son aproximadamente iguales o donde el radio de curvatura es el máximo. La localización de este punto puede ocurrir en cualquier posición de las secciones del condensador o adiabática pero típicamente ocurre en un punto localizado cerca del final del condensador, lo más alejado del evaporador.

La Figura 6b, ilustra la relación entre las presiones estáticas del líquido y del vapor en la operación del caloducto. Como se observa, el gradiente de presión capilar a través de la interfaz líquido-vapor es igual a la diferencia de presión entre las fases del líquido y del vapor en cualquier posición axial dada.

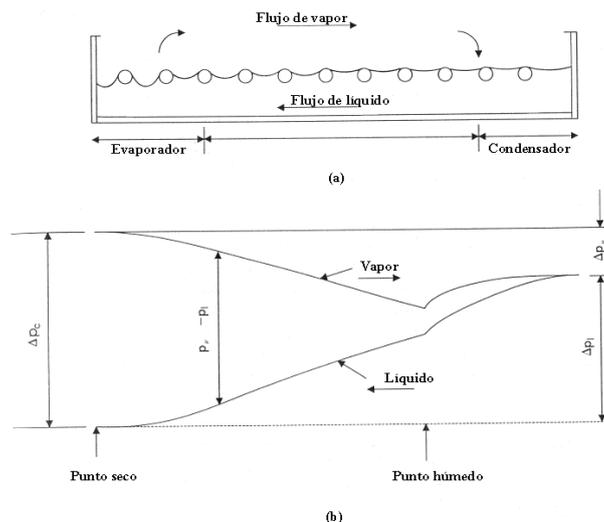
Para que un caloducto funcione apropiadamente, la diferencia de presión capilar neta entre los puntos “húmedo” y “seco” identificados en la figura 2b, deberá ser mayor que la sumatoria de todas las pérdidas de presión ocurridas a lo largo de las vías de flujo del líquido y de vapor. Esta relación, conocida como la limitación capilar, se expresa como:

$$(\Delta P_c)_m \geq \int_{L_{eff}} \frac{\partial P_v}{\partial x} dx + \int_{L_{eff}} \frac{\partial P_l}{\partial x} dx + \Delta P_{ph,e} + \Delta P_{ph,c} + \Delta P_+ + \Delta P_{\downarrow}$$

Cuando la sumatoria de las seis caídas de presión exceden la presión de bombeo capilar máxima, el fluido de trabajo no es reemplazado lo suficientemente rápido al evaporador para compensar la pérdida de líquido a través de la vaporización y la estructura capilar llega a secarse. Esta condición, denominada como limitación capilar, varía de acuerdo a la estructura capilar, el fluido de trabajo, el flujo de calor en el evaporador y la temperatura de operación. (Peterson, 1994)

Figura 6

- (a) Variación de curvatura de menisco en función de la posición axial.
- (b) Distribuciones de presión de vapor y de líquido en caloductos.



Nota: adaptado de An Introduction to Heat Pipes, Modeling, Testing and Application, Peterson, G.P., 1994, Wiley-Interscience.

MÉTODO

El análisis termodinámico de las condiciones de operación a las que es sometido un caloducto permite el diseño de uno de tipo ranurado axial que puede fabricarse en material de cobre, material fácil de manejar y muy común en tubos existentes en una diversidad de diámetros y con

una elevada conductividad térmica; que utiliza agua como fluido de trabajo, uno de los fluidos más utilizados por las ventajas que ofrece su compatibilidad con el material utilizado, por ser fácil de conseguir y que opera dentro de un rango de temperaturas de entre 5 a 230°C, con el caloducto y con elementos calefactores disponibles en el mercado, con periodos de funcionamiento promedio de entre 80,000 y 100,000 horas sin degeneración.

Dentro de los puntos básicos de partida para el diseño de caloductos, deben de conocerse el flujo de calor que se desea transmitir y el rango de temperaturas en el que se deberá operar el dispositivo. Más aún, habiendo determinado el fluido de trabajo, resta determinar el material con el que se habría de diseñar el caloducto; uno que resulte compatible y no afecte el funcionamiento que, por esta causa, se dan en los caloductos.

Deben de involucrarse, por tanto, la mayor conductancia térmica y el máximo factor de transporte del material seleccionado compatible con el fluido de trabajo.

Como base para el diseño se toman, el máximo calor a transmitir y las propiedades de fluido, y se estima el diámetro de la zona reservada al flujo de vapor de tal manera que la velocidad de éste no sea excesiva y se mantenga en el régimen subsónico con un pequeño gradiente de presión. De esta manera, se asegura un gradiente axial de temperaturas reducido y un funcionamiento estable. El criterio generalmente aceptado es el número de Mach del flujo de vapor, definido mediante la ecuación:

$$M_v = \frac{Q}{A_v \rho h_{fg} C} < 1$$

Consideraciones preliminares de diseño

El diseño y fabricación de caloductos es un proceso extremadamente complejo que involucra muy diferentes variables físicas tales como el tamaño, la forma, el peso y el volumen del dispositivo, las propiedades termofísicas del fluido de trabajo, la estructura capilar y las propiedades del material de fabricación, además de algunos otros aspectos tales como, la carga térmica, la distancia de transporte, la longitud del evaporador/condensador, un gradiente de temperatura aceptable, el rango de temperaturas de operación, la condición gravitacional, la interfaz fuente-sumidero, la cantidad de fluido, duración/precisión y la seguridad.

Sumado a lo anterior, el diseño y fabricación de caloductos está gobernado por tres consideraciones operacionales:

- El rango de temperaturas de operación, el cual está determinada por la selección del fluido de trabajo,
- La potencia máxima que el caloducto es capaz de transportar, la cual está determinada por la capacidad de bombeo de la estructura capilar y,
- El máximo flujo de calor en el evaporador, el cual está determinado por el punto al cual ocurre la ebullición nucleada.

La Tabla 1, presenta la matriz que indica el cómo cada uno de los tres componentes primarios, el fluido de trabajo, el material capilar y el material del recipiente, pueden afectar los diversos requerimientos del diseño. Como se muestra, un simple componente no parece ser más importante que el otro y, muy pocos requerimientos de diseño son afectados por solamente uno de los tres componentes. (Peterson, 1994)

Tabla 1

Componentes del caloducto y su influencia sobre los requerimientos del diseño

REQUERIMIENTOS DEL DISEÑO	FLUIDO DE TRABAJO	MATERIAL CAPILAR	MATERIAL DEL RECIPIENTE
Rendimiento térmico			
Capacidad de transporte	F	F	D
Rango de temperaturas de operación	F	D	D
Caída de temperatura	M	D	D
Mecánicos			
Requerimientos físicos (peso, tamaño, etc.)	D	D	M
Espesor de pared-presión interna	D	N	F
Interfaz de sumidero-fuente	N	N	F
Cargas Dinámica/estática	M	F	M
Fiabilidad y seguridad			
Compatibilidad del material	F	F	F
Corrosión externa	N	N	
Fabricación	M	M	M
Presión del compartimiento/fugas	D	M	F
Toxicidad	F	D	D
Ambiente gravitacional			
> 1g	F	F	F
1g	M	M	D
< 1g	D	M	D

Nota: Adaptado de An Introduction to Heat Pipes, Modeling, Testing and Application, Peterson, G.P., 1994, Wiley-Interscience.

RESULTADOS

Determinación de dimensiones para el diseño de un caloducto

El diseño de un caloducto ranurado debe considerar el diámetro interior del recipiente como el reservado para el vapor mientras que para el diseño de caloductos que cuentan con estructura capilar deben considerar el diámetro interior de esta para el mismo efecto. Este diámetro, junto con la presión del vapor del fluido de trabajo a la temperatura de operación y el material del caloducto (compatible con el fluido de trabajo) determinan el espesor que deben tener las paredes del tubo y la de las tapas en sus extremos, con lo que se tiene así, una selección preliminar de las dimensiones del caloducto. (Fernández, 1999)

Se sabe que para un caloducto dado que funciona a una temperatura dada se identifica el límite que alcanza más rápido y con ello se determinan sus dimensiones.

Para el caso del diseño de un caloducto:

Material: Cobre

Diámetro exterior: 1.6 cm

Diámetro interior: 1.3 cm

Tipo: Ranurado axial

Fluido de trabajo: Agua

Temperatura de funcionamiento: 100°C.

Las propiedades ideales de vapor de saturación son:

$$P = 101.35 \text{ kPa}$$

$$h_{fg} = 2,257 \text{ kJ/kg}$$

$$\rho = 0.5977 \text{ kg/m}^3$$

Siendo el límite sónico el primero en alcanzarse en caloductos con estas especificaciones, la velocidad del sonido, utilizando la relación de calores específicos,

$$\gamma = C_p / C_v = 1.4$$

estará dado por:

$$C = \sqrt{\gamma g_c RT} = \sqrt{(1.4) \left(1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{N} \cdot \text{s}}\right) (461.9 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}) (373.5 \text{K})} = 492.22 \text{ m/s}$$

El área de flujo de vapor es de:

$$A_v = \pi \frac{D_v^2}{4} = \pi \frac{(0.013)^2}{4} = 1.3273 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Utilizando una resistencia eléctrica cuya capacidad máxima es de 1550 W y sustituyendo A_v en la ecuación 1., se obtiene un número de Mach de:

$$M_v = \frac{1.55 \text{ kW}}{(1.3273 \times 10^{-4}) (0.5977 \text{ kg/m}^3) (2,257 \text{ kJ/kg}) (491.22 \text{ m/s})} = 0.01762$$

lo cual implica que el flujo de vapor es subsónico y es igual a:

$$V_v = M_v C = (0.01762) (491.22) = 8.6564 \text{ m/s}$$

Dependiendo de la longitud de la resistencia eléctrica que se utilice es que se fija automáticamente la longitud del evaporador; una resistencia con longitud de 0.2 m determina una longitud de este de 20 cm. Con una eficacia requerida del 90% de transporte de calor para la sección del condensador y una diferencia de temperatura a través de la pared del caloducto de 0.25 °C, se estima la longitud de este mediante:

$$L = \frac{Q \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi k \Delta T} = \frac{1550 \ln\left(\frac{0.008}{0.0065}\right)}{2\pi (394) (0.25)} = 0.52 \text{ m}$$

Para aplicaciones relacionadas con intercambio de calor en caloductos, la longitud de la zona adiabática se toma cuando menos como un 14 por ciento de la longitud total del dispositivo mientras que cerca del 86 por ciento se destina a las demás zonas, con el fin de aumentar la superficie de transferencia de calor.

Esto implica, de acuerdo a los cálculos realizados, una longitud mínima de 12 cm para la zona adiabática y 84 cm de longitud total del caloducto.

Para nuestro caso, las dimensiones del caloducto quedan definidas por:

$$Le = 20 \text{ cm}$$

$$Lc = 52 \text{ cm}$$

$$La = 12 \text{ cm}$$

DISCUSIÓN

Sin embargo, cuando se predetermina un caloducto de longitud total de 50 cm y 13 mm de diámetro interior, en razón de ser las dimensiones mínimas de tubería que se pueden utilizar para el ranurado axial y por las condiciones de vacío a las que se somete, y de acuerdo a los cálculos realizados se pudiera considerar:

$$La = 10 \text{ cm}$$

$$Le = 20 \text{ cm}$$

$$Lc = 20 \text{ cm}$$

Para la sección adiabática hasta un 20 por ciento de la longitud total del caloducto, lo que implica una mayor superficie con características isotérmicas dada la ausencia de gradientes de temperatura a lo largo de esta sección, al no existir transferencia de calor. Para la sección de evaporación hasta un 40 por ciento en virtud del tamaño de la resistencia y finalmente un 40 por ciento para la sección de evaporación.

Esto implicaría:

El suministro de calor menor a 1550 W y su rechazo total en la zona del condensador sin riesgo de que se alcance el límite sónico o,

La disminución de la longitud de la zona de evaporación, con una resistencia eléctrica que permita suministrar mayor potencia sin alcanzar los 1550 W, y el incremento de la zona del condensador que permita eliminar el calor suministrado sin que se alcance el límite sónico.

El volumen de fluido de trabajo que se ha de adicionar se considera de un 15% del volumen libre del caloducto de acuerdo con las recomendaciones señaladas.

Con desprecio de las dimensiones de la ranura se tiene para el volumen del caloducto:

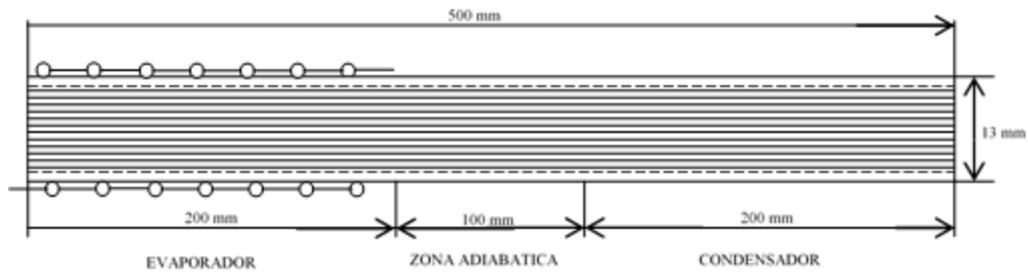
$$V_{vs} = \frac{\pi}{4} D_{vs}^2 L_r = (1.3273 \times 10^{-4})(0.5 \text{ m}) = 6.63 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \qquad V_{vs} = 66.3 \text{ cm}^3$$

lo cual implica la adición de $9.94 \approx 10$ ml de agua.

En la Figura 7, se muestra una vista gráfica del caloducto con las longitudes de todas las zonas, su diámetro y longitud y disposición de la resistencia.

Figura 7

Dimensiones del caloducto



Es claro que el material y las dimensiones del caloducto se encuentran en función del tipo de fluido, así como de los flujos de calor que se transmitirán y que están en dependencia del tipo de aplicación a que será sometido el dispositivo.

REFERENCIAS

- Cengel, Yunus., A. (1998). *Heat Transfer: a practical approach.*, WCB/McGraw Hill., U.S.A., 1998. WCB/McGraw Hill., U.S.A.
- Castle, R. Michael., Thomas, Scott K., & Yerkes, Kirk L. (August 20-22, 2000). *The effect of working fluid inventory on the performance of revolving helically-grooved heat pipes.* 34th National Heat Transfer Conference. Pittsburgh, Pennsylvania, USA, NTHC2000-12268.
- Dunn, P. D., & Reay, D. A. (1994). *Heat Pipes* (First Edition). Pergamon Press Ltd. England.
- Fernández, N. Fernando. (1999). *Caracterización Teórico-Experimental de un equipo de recuperación de calor en base a tubos termosifones bifásicos.* [Tesis de Maestría]. I.P.N., ESIME. México, D.F.
- Galindo, R. Gerardo. (Septiembre 2003), *Desarrollo del programa de Cómputo Calca para el diseño termodinámico de Caloductos orgánicos*”, [Tesis de Maestría]. I.P.N., ESIME. México, D.F.
- Girrens, Steven P. (1982). Design and development of a Titanium Heat Pipe Space Radiator. LA-9251-MS, UC-38, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New México, March 1982.
- Holman, J.P., *Transferencia de Calor* (8ª Edición (1ª en español)). (1998). McGraw Hill/Interamericana de España, U.S.A.
- Klasing, Kevin S., Thomas, Scott K., Prediction of the Operating Limits o Revolving Helically Grooved Heat Pipes. Wright State University, Dayton, OH 45435, Yerkes, Kirk L., Wright-Patterson AFB, 45433-7251.
- Peterson, G. P. (1994). *An Introduction to Heat Pipes, Modeling, Testing and Application.* Wiley-Interscience. U.S.A.
- Silvestein, Calvin., C. (1992). *Design and Technology of Heat Pipes for Cooling and Heat for Cooling and Heat Exchange.* Hemisphere Publishing Corporation. U.S.A.

ANEXO

Nomenclatura

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
A	Área de sección transversal.
L	Longitud.
M	Número de Mach.
P	Presión.
ΔP	Caída y/o diferencia de presión.
Q	Transferencia de calor.
T	Temperatura.
V	Volumen.
We	Número de Weber
h_{fg}	Calor latente de vaporización.
R	Radio.
μ	Viscosidad absoluta.
ρ	Densidad.
σ	Tensión superficial.
K	Conductividad térmica
L_t	Longitud total
R	Constante del vapor
P	Presión.
Q	Transferencia de calor.
T	Temperatura.
h_{fg}	Calor latente de vaporización.
r	Radio.
ρ	Densidad.

SÍMBOLO SUBÍNDICE	SIGNIFICADO
e	Evaporador
eff	Efectiva
i	Interior
l	Líquido
v	Vapor
W	Estructura capilar
↓	Hidrostática axial
+	Hidrostática normal

Todo el contenido de **LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades**, publicados en este sitio está disponibles bajo Licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) .