

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Concepto de tubo de calor

Los tubos de calor son dispositivos altamente efectivos para la transferencia de calor. Su funcionamiento se basa en los fenómenos de evaporación y condensación del fluido de trabajo que existe en su interior, así como en el flujo del fluido por capilaridad. Su construcción es relativamente sencilla; están conformados por un tubo hueco, cuyas paredes internas se encuentran cubiertas por un material capilar, por ejemplo, fibras o mallas metálicas. El tubo se llena con una pequeña cantidad de fluido de trabajo, cuya composición varía según la aplicación para la cual se destine el tubo. La velocidad de transferencia de calor de estos dispositivos es, generalmente, miles de veces mayor a la del mejor conductor sólido de las mismas dimensiones. Esto se debe al transporte del calor latente de vaporización del fluido de trabajo de un extremo del tubo al otro y también al hecho de que los dos extremos del tubo operan prácticamente a la misma temperatura. El concepto de un "tubo de calor" fue sugerido por primera vez en el año de 1942. En 1962, G.M. Grover se convierte en el inventor formal del tubo de calor, y es en este año cuando se inicia la investigación y desarrollo de estos dispositivos. Desde su invención hasta la actualidad, los tubos de calor han

incursionado en muchas áreas de la transferencia de calor. Las aplicaciones más comunes de estos equipos son:

- Acondicionamiento y dehumidificación de aire
- Enfriamiento de componentes de computadoras portátiles
- Rechazo de calor e igualación de temperatura en vehículos espaciales

La característica distintiva de los tubos de calor es el ser una bomba de calor que no requiere energía ajena a la calorífica para operar. No se requiere de equipos como bombas o compresores para el transporte de calor de un medio a otro, lo que hace del tubo de calor un dispositivo prácticamente pasivo. Al no tener partes móviles, el mantenimiento requerido por los tubos de calor es poco o nulo y la probabilidad de que este equipo falle es baja. Pueden ser utilizados en un amplio intervalo de temperaturas, según el fluido de trabajo que se utilice y los materiales de construcción del tubo.

1.2 Revisión bibliográfica [1, 2, 9]

1.2.1 Transferencia de calor

Al poner en contacto dos objetos cualesquiera y existir entre éstos una diferencia de temperaturas, el calor contenido en el objeto con mayor temperatura pasará a través de éste y hacia el objeto con la temperatura menor, de manera espontánea. La transferencia de calor se produce espontáneamente siempre en sentido de potencial decreciente, esto quiere decir que el calor siempre fluye de manera espontánea en la

dirección en la cual la temperatura disminuye. El calor puede transferirse por tres mecanismos diferentes: conducción, convección y radiación.

1.2.2 Conducción

Al existir un gradiente de temperatura en materia continua, el calor fluye sin necesidad de que exista transferencia de masa. La conducción se presenta cuando un cuerpo, o cuerpos distintos en contacto directo, experimentan transferencia de calor a causa de diferencias finitas de temperatura. Según la Ley de Fourier, el flux de calor (calor transferido por unidad de área) es proporcional a la diferencia de temperaturas. Para flujo unidimensional de calor, la ley de Fourier está descrita en la ecuación 1.

$$\frac{dq}{dA} = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Donde q es la tasa de transferencia de calor en dirección normal a la superficie, A es el área de la superficie, T es la temperatura, x es la distancia normal a la superficie y k es una constante de proporcionalidad, denominada *conductividad térmica*.

1.2.3 Convección

Es el fenómeno por el cual el calor se transporta mediante el movimiento de un fluido. El flux de calor convectivo es proporcional a la diferencia de temperaturas entre la temperatura de la superficie de calentamiento y la temperatura en el líquido lejano a la superficie, como se muestra en la ecuación 2.

$$\frac{q}{A} = h(T_s - T_f) \quad (2)$$

Donde q es el flujo de calor, A es el área de calentamiento, T_s es la temperatura de la superficie, T_f es la temperatura en el fluido y h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor.

1.2.4 Radiación

La radiación es el mecanismo por el cual se transfiere energía a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. Si la radiación atraviesa un espacio vacío, ésta no se transforma en calor o alguna otra forma de energía y no es desviada. Si entra en contacto con materia, la radiación puede ser transmitida, reflejada o absorbida. La radiación absorbida es la única que se manifiesta cuantitativamente en forma de calor. La energía emitida por un cuerpo negro, una clase de materia hipotética que absorbe en su totalidad la radiación que recibe, es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta:

$$W_b = \sigma T^4 \quad (3)$$

Donde W_b es la tasa de emisión de energía radiante por unidad de área, σ es la constante de Stefan-Boltzmann y T es la temperatura absoluta. El cuerpo negro tiene la máxima absorptividad posible, que es igual a la unidad, y además posee la máxima emisividad ε posible en la naturaleza. La *emisividad* es la relación entre la energía radiada por un material y la energía radiada por un cuerpo negro, a la misma temperatura. Debido a que en el mundo prácticamente no existe materia que se comporte como cuerpo negro, la ecuación 3 no tiene un uso práctico. La emisividad de un cuerpo normal no puede ser igual a la unidad, por lo que, para el caso de un cuerpo opaco de área A , emisividad ε y temperatura absoluta T la radiación por unidad de área se define como:

$$\frac{q}{A} = \sigma \varepsilon T^4 \quad (4)$$

1.2.5 Coefficiente convectivo de transferencia de calor (h)

Como puede observarse en la ecuación 2, la relación lineal en la fuerza motriz $T_s - T_f$ es similar a la que se presenta en el caso de la transferencia de calor por conducción en un sólido de conductividad térmica constante. Sin embargo, el coeficiente convectivo de transferencia de calor h no es una propiedad intrínseca del fluido, sino que depende de las velocidades y patrones de flujo que son regidos por la mecánica de fluidos y las propiedades termofísicas del fluido.

1.2.6 Flujo en régimen laminar

El flujo laminar ocurre cuando las capas de líquido fluyen deslizándose una por encima de la otra y no existe mezclado lateral ni contracorrientes. Esto ocurre generalmente a velocidades de flujo bajas. El perfil de velocidades de flujo es parabólico.

1.2.7 Flujo en régimen turbulento

El régimen turbulento se presenta a velocidades de flujo elevadas y se caracteriza por que el flujo se mezcla lateralmente y existen corrientes turbulentas dentro del mismo, lo que ocasiona que se pierda la característica laminar de las capas de fluido que se deslizan sobre las capas adyacentes. El perfil de velocidades de flujo es más achatado que el que ocurre en el régimen laminar.

1.2.8 Convección natural

Al existir en el interior de un fluido gradientes de temperatura, se generan fuerzas de flotación. Estas fuerzas de flotación, consecuencia de la diferencia de densidades, provocan corrientes ascendentes en el fluido. Cuando la transferencia de calor por convección se presenta únicamente mediante este mecanismo, se dice que la transferencia de calor ocurre por convección natural.

1.2.9 Convección forzada

Cuando las corrientes mencionadas anteriormente son generadas por medios externos como ventiladores, agitadores, bombas, etc., el flujo es independiente de la diferencia de densidades. Las corrientes formadas por las fuerzas de flotación aún existen, pero su efecto es mínimo. A este mecanismo se le conoce como convección forzada.

1.2.10 Evaporación

Proceso por el cual las moléculas de un líquido entran al estado gaseoso al reunir la suficiente energía cinética. La evaporación es un fenómeno exclusivamente superficial, a diferencia de la ebullición. La evaporación no requiere que la presión de vapor del líquido iguale a la presión del ambiente, por lo que se puede presentar sin necesidad de la sustancia se encuentre en el punto de ebullición y este fenómeno puede existir a cualquier temperatura. La tasa de evaporación está determinada por la temperatura del líquido, la concentración de la sustancia en el ambiente, las fuerzas intermoleculares y el área de evaporación. La evaporación se presenta en el extremo del evaporador del tubo de calor, y produce un vapor que viaja al otro extremo del tubo, donde se condensa.

1.2.11 Saturación

Al existir contacto entre las fases de vapor y líquido de un fluido, existe un flujo de moléculas desde una fase hacia la otra y viceversa. Si el flujo de moléculas que viajan desde la fase vapor hacia la fase líquida es exactamente el mismo que el flujo desde la fase líquida hacia la fase vapor, se dice que existe equilibrio de fases, y cada fase tiene las mismas presiones y temperaturas. En este caso, a la temperatura a la cual ocurre este fenómeno se le denomina *temperatura de saturación*, y a la presión existente se le conoce como *presión de saturación* o *presión de vapor*.

1.2.12 Sobrecalentamiento

Si un líquido posee una temperatura mayor a la temperatura de saturación, se dice que el líquido está sobrecalentado. El grado de sobrecalentamiento es igual a la diferencia entre la temperatura de dicho líquido y la temperatura de saturación, función de la presión del sistema. Al ocurrir esto, la presión de vapor que corresponde a la temperatura del líquido sobrecalentado es mayor a la presión real del líquido. Los sitios de nucleación, que son pequeñas irregularidades en la superficie sólida en contacto con el líquido, son sitios en donde se puede acumular vapor o gas no condensable. Debido a esto, existe siempre una interfase líquido-vapor en cualquier líquido que esté en contacto directo con una superficie, y esto se debe a la existencia de los sitios de nucleación. El líquido sobrecalentado preserva su estabilidad, pese a que exista vapor en los sitios de nucleación, mientras la diferencia de presiones entre el líquido y el vapor en los sitios de nucleación sea menor a la máxima presión capilar disponible. Si esto ocurre, las burbujas del vapor se desprenderán de los sitios de

nucleación y subirán hacia la superficie del líquido, generando del fenómeno de la ebullición.

1.2.13 Ebullición

La ebullición puede presentarse en diferentes regímenes, los cuales están determinados por la diferencia de temperatura entre el fluido en ebullición y la superficie a través de la cual fluye el calor. Al relacionar esta diferencia de temperaturas y el flux de calor que se suministra al fluido, se obtiene un comportamiento como el expuesto en la figura 1. Al analizar la figura se observa que la curva puede dividirse en cuatro segmentos: el segmento AB , que es una línea recta, el segmento BC que es también prácticamente recto, el segmento CD y el segmento DE , éstos últimos líneas curvas. El punto C indica el flux máximo, a cuyo ΔT se le conoce como ΔT crítico, mientras que el punto D representa el flux mínimo a partir del punto C . Al punto D también se le conoce como punto de Leidenfrost. Los segmentos antes mencionados representan regímenes de ebullición bien definidos, los cuales se detallan a continuación.

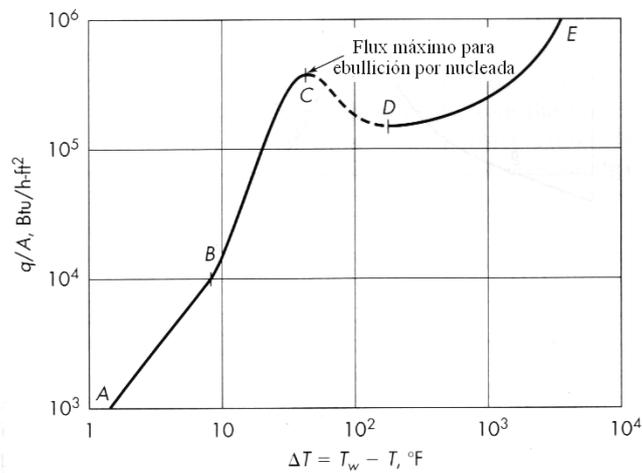


Figura 1. Regímenes de ebullición.

1.2.14 Ebullición nucleada

En la ebullición nucleada, que ocurre en los segmentos *AB* y *BC* de la figura 1 se presenta al existir un ΔT menor al ΔT crítico. Este régimen de ebullición se caracteriza por la formación de pequeñas burbujas o núcleos de vaporización en la superficie que transfiere el calor hacia el fluido. Cuando esto ocurre, las burbujas ocupan una pequeña fracción de la superficie de calentamiento, y la mayor parte de la superficie está en contacto con el líquido. Las burbujas generalmente se forman en sitios activos, los cuales son pequeñas irregularidades, cavidades o rasguños en la superficie.

1.2.15 Ebullición de transición

Si a partir de la zona de ebullición nucleada se continúa aumentando la ΔT , se llegará a una condición en la que la cantidad de burbujas que se forman en los sitios activos es tan grande que éstas coalescen y forman una capa de vapor aislante entre la superficie y el líquido, sin embargo, esta capa de vapor es inestable y se generan pequeñas explosiones que envían chorros de este vapor hacia el seno del líquido. Este régimen de ebullición se conoce como ebullición de transición, y corresponde al segmento *CD*. Al aumentar el ΔT se incrementa el espesor de la capa de vapor, lo que reduce el flux de calor y el coeficiente convectivo.

1.2.16 Ebullición en película

Al sobrepasar el punto de Leidenfrost, la capa de vapor formada en la etapa de ebullición de transición se queda estática, lo que ocasiona que el calor sea transferido a través del vapor y hacia el líquido por conducción, y si la ΔT es muy elevada,

también por radiación. Las explosiones de vapor que se generaban en la ebullición de transición desaparecen en este régimen, y lentamente se forman burbujas en la interfase entre el vapor estático y el líquido. Cuando estas burbujas tienen el tamaño suficiente, se desprenden de la interfase y suben a través del líquido. En este régimen de ebullición, la resistencia a la transferencia de calor es impuesta casi en su totalidad por la capa de vapor. Si se continúa incrementando la ΔT , el flux de calor aumenta, primero lentamente y después con más rapidez, al tener cada vez más influencia la transferencia de calor por radiación.

1.2.17 Tensión superficial

Toda superficie que se encuentre en estado líquido se encuentra en un estado de tensión. Al estar rodeadas de otras moléculas, las moléculas interiores de un líquido están sujetas a fuerzas ejercidas por otras adyacentes. La fuerza neta sobre una molécula que se encuentra completamente rodeada por otras es cero, ya que los efectos de las fuerzas de igual magnitud pero con sentido opuesto se neutralizan. Esto no es válido para las moléculas de la superficie, y estas presentan una fuerza neta de atracción hacia el interior del líquido. Termodinámicamente, la tensión superficial es una medida del cambio en la energía libre de Gibbs con respecto al cambio en el área superficial de un líquido, a presión y temperatura constantes, como lo muestra la ecuación 5:

$$\sigma = \left(\frac{\partial G}{\partial A} \right)_{P,T} \quad (5)$$

Donde σ es la tensión superficial del líquido, G es la energía libre de Gibbs y A el área superficial del líquido. Al analizar la ecuación 5 se observa que el proceso espontáneo ($\Delta G < 0$) ocurre sólo al disminuir el área superficial del líquido, lo que

indica que el líquido presenta una tendencia espontánea a disminuir su área superficial. Así, se describe a la tensión superficial como la medida de la espontaneidad con la cual sucede un cambio en el área superficial del líquido.

1.2.18 Mojabilidad

La mojabilidad es la propiedad que permite que un líquido se adhiera y se distribuya sobre una superficie sólida. Al colocar una gota de líquido sobre una superficie sólida, la gota tiende a deformarse, lo que produce un ángulo de contacto ϕ_{ls} con la superficie. Las fuerzas de adhesión y cohesión son las que determinan la magnitud de este ángulo, lo que permite determinar qué fuerza predomina sobre la otra. Cuando el ángulo de contacto es menor a 90° , las fuerzas de adhesión entre el líquido y la superficie sólida predominan sobre las de cohesión, y entonces se dice que el líquido moja al sólido. El caso contrario, cuando el ángulo es mayor a 90° , refleja un dominio de las fuerzas de cohesión sobre las de adhesión, lo que indica que el líquido no moja la superficie.

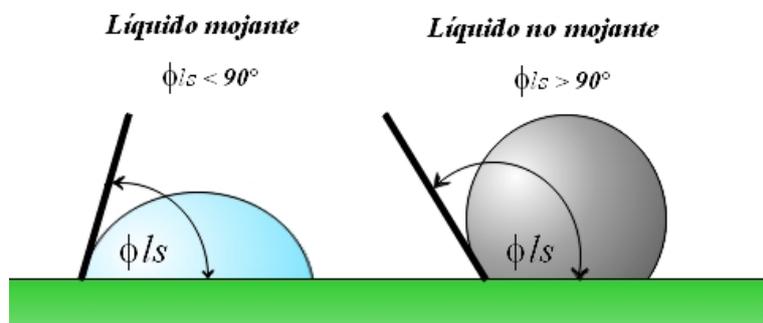


Figura 2. Mojabilidad y ángulo de contacto.

Los efectos de capilaridad son muy grandes cuando el ángulo de contacto ϕ_{ls} es cercano a 0° o a 180° , y son mínimos cuando el ángulo se acerca a 90° ,

desapareciendo por completo cuando el ángulo es igual a 90° . Generalmente, en las aplicaciones de tubos de calor, se utilizan fluidos con mojabilidad alta. La mojabilidad de una superficie al ponerse en contacto con distintos líquidos es afectada por la tensión superficial. Cuando la tensión superficial aumenta, el ángulo de contacto ϕ_{ls} aumenta y por consiguiente la mojabilidad disminuye. La rugosidad de la superficie también tiene efectos sobre la mojabilidad de una superficie, los cuales dependen de la naturaleza del fluido en contacto con la superficie. Si el ángulo de contacto para una superficie lisa es menor a 90° , el ángulo se reducirá, lo que generará un aumento en la mojabilidad, pero existirá un efecto contrario si el ángulo de contacto es mayor a 90° . De esta manera se puede tener cierto control sobre la mojabilidad de un líquido sobre una superficie determinada.

1.2.19 Capilaridad

La capilaridad es la capacidad que presenta una superficie curva de líquido de mantener un diferencial de presión a través de la superficie, cuya magnitud se denomina presión capilar. La presión capilar es función del radio de curvatura de la superficie líquida, del ángulo de contacto ϕ_{ls} y la tensión superficial del líquido. La capilaridad también se presenta en cuerpos porosos, como es el caso del material capilar del tubo de calor. Esta diferencia de presión puede calcularse, para tubos capilares de radio r , un líquido con tensión superficial σ y un ángulo de contacto ϕ_{ls} , con la ecuación 6:

$$\Delta P_c = \left(\frac{2\sigma}{r} \right) \cos \phi_{ls} \quad (6)$$

La diferencia de presión que se genera en un tubo capilar puede utilizarse para compensar la caída de presión que experimenta un fluido al fluir por un tubo capilar, por lo que si se retira fluido de un extremo del tubo capilar, la diferencia de presión capilar hará que la misma cantidad de fluido retirado entre al tubo por el extremo opuesto. Para el caso de la presión capilar máxima que se genera en un material poroso, como el capilar de un tubo de calor, la ecuación 6 puede escribirse como:

$$\Delta P_c = \frac{4\sigma}{D_p} \quad (7)$$

Donde σ es la tensión superficial del líquido y D_p es el diámetro efectivo del poro.

1.3 Características operativas del tubo de calor

El funcionamiento del tubo de calor puede resumirse en cuatro principales etapas. En la primera etapa, el calor que entra al tubo a través de las paredes en la sección del evaporador provoca la ebullición del fluido de trabajo. En la segunda, el vapor se desplaza desde el extremo del evaporador hacia el condensador, debido a la existencia de un diferencial de presión. En la tercera, el vapor que llega al otro extremo del tubo se condensa, liberando en este lugar su calor de vaporización, el cual sale a través de la pared del tubo hacia el medio ambiente. En la cuarta etapa, el líquido condensado regresa hacia el evaporador, mediante la acción capilar del empaque del tubo; esta etapa puede ocurrir con ayuda de la gravedad o sin ayuda de ésta.

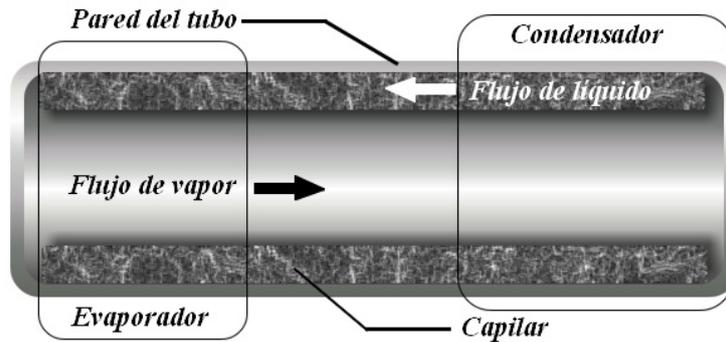


Figura 3. Esquema del tubo de calor.

La operación de un tubo de calor depende principalmente de los fenómenos de evaporación, condensación y capilaridad. Estos fenómenos, al presentarse de manera conjunta y en ciertas condiciones, permiten que el tubo de calor opere de manera correcta. El fenómeno de evaporación-condensación es el principal responsable de la transferencia de masa dentro del tubo, y por consiguiente de la transferencia de calor de un extremo del tubo al otro. La presión capilar permite el retorno del fluido de trabajo condensado a la zona de evaporación del tubo, aún en condiciones de ingravidez. Un correcto balance entre estos dos fenómenos de transporte permite la operación en estado estable del tubo de calor.

1.3.1 Generalidades

El tubo de calor es un dispositivo para la transferencia de calor, basado en la evaporación y condensación de un fluido de trabajo. El tubo además contiene en su interior un material capilar, el cual tiene la función de bombear el líquido condensado de vuelta al evaporador. Debido a que el líquido y el vapor que contiene el tubo de calor están en equilibrio, la presión interna del tubo de calor es igual a la presión de vapor, función de la temperatura a la cual se opera el tubo. Al introducirse el calor a

través de la pared del tubo hacia el interior, se produce la evaporación del líquido de trabajo, contenido en el capilar, generando un diferencial de presión. Esta diferencia de presiones en ambos extremos del tubo es consecuencia de la acumulación de vapor en el extremo del condensador y de la salida de vapor en el evaporador. Mientras esto sucede con el vapor, el líquido condensado en el condensador se acumula, formando una superficie generalmente plana, lo que no ocasiona disminución en la presión del líquido. El extremo del condensador contiene líquido cuya superficie se ha curvado, lo que disminuye su presión. Este gradiente de presión provoca que el líquido fluya a través del capilar hacia el extremo del evaporador. Debido a que esta diferencia de presión es mínima y a que el vapor y el líquido están en equilibrio, la diferencia de temperaturas es mínima, lo que le da al tubo de calor una de sus principales cualidades, que es la habilidad de transportar calor con una caída de temperatura muy pequeña. Este hecho hace que la conductividad térmica efectiva de un tubo de calor sea varios órdenes de magnitud mayor a la de un tubo sólido de cobre de las mismas dimensiones. Al controlar el área de las zonas de evaporación y condensación puede controlarse el flux superficial de calor, porque la tasa de transporte de calor es la misma para ambas zonas. Esto hace al tubo de calor muy útil para aplicaciones en las cuales los fluxes de calor de la fuente de calor y el pozo de calor son muy distintos.

1.3.2 Fluido de trabajo

El fluido de trabajo que utilizará un tubo de calor debe elegirse cuidadosamente, y su elección depende de factores como: temperatura de operación, material de construcción del tubo, material del capilar y geometría del tubo. No todos los fluidos

pueden utilizarse en cualquier condición, ya que los fluidos sólo tienen un intervalo de temperatura determinado en el cual pueden utilizarse. El intervalo de temperaturas en el cual cierto fluido es útil es función de los límites capilar, sónico, de ebullición y acarreamiento, los cuales se definirán posteriormente. Cuando se presentan tasas de transferencia de calor bajas, el intervalo de temperaturas es amplio, y se delimita en la parte superior por el límite de ebullición y en la parte inferior por el límite sónico.

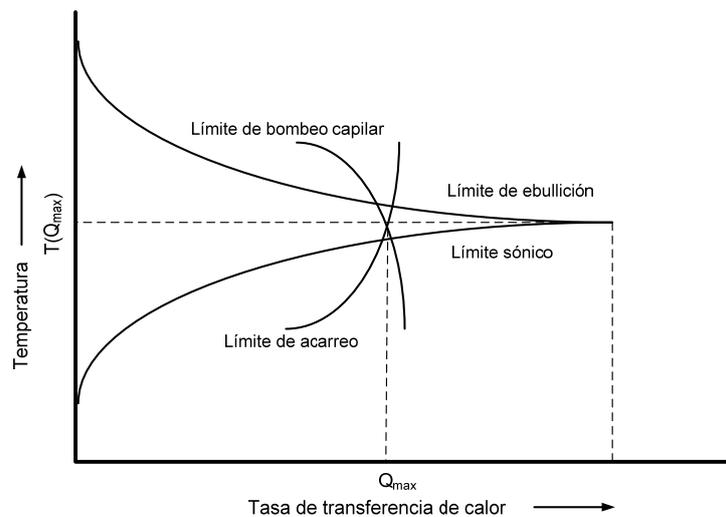


Figura 4. Límites a la transferencia de calor.

Al aumentarse la tasa de transferencia de calor, el intervalo de temperaturas disminuye, debido a la presencia del límite de bombeo capilar y del límite de acarreamiento. Al continuar incrementando la tasa, se llega al punto donde el intervalo de temperaturas es un solo punto, denominado $T(Q_{max})$, el cual representa la máxima tasa de transferencia de calor que se puede lograr con el fluido (ver figura 4). Se puede obtener un estimado del intervalo de temperaturas de operación para un fluido, ya que para los fluidos de trabajo más comunes, la presión de vapor de operación se encuentra entre 6,895 y 689,500 Pa. Al hacer esta suposición se pueden calcular los límites a la transferencia de calor, lo que arroja el intervalo de temperaturas de

operación para el fluido de trabajo en cuestión. Cabe destacar que éste es un intervalo aproximado, y para mayor certeza deben efectuarse los cálculos tomando en cuenta todas las variables descritas y la geometría del tubo de calor. En la figura 5 se muestran los intervalos de temperatura de operación para los fluidos de trabajo más comunes.

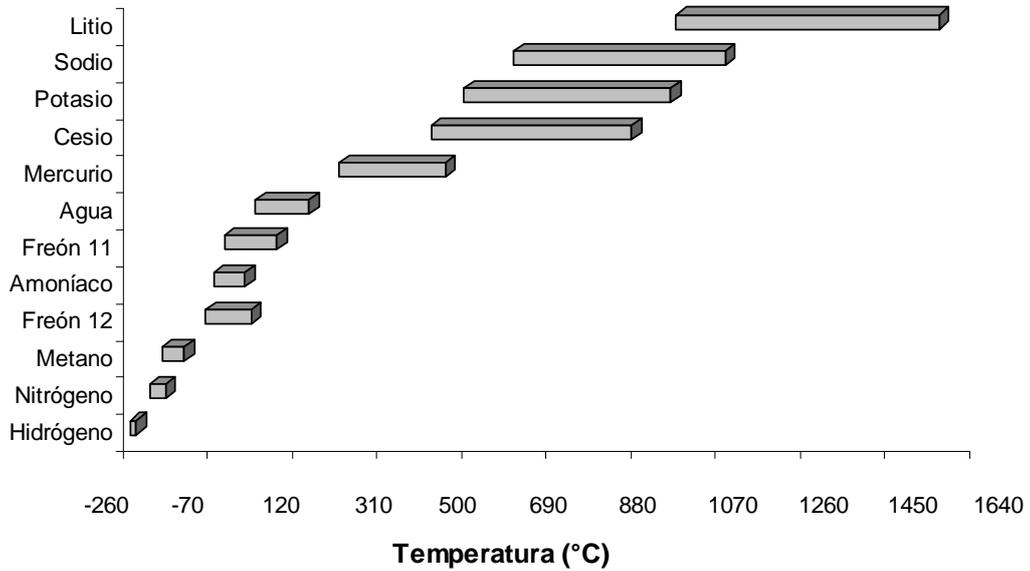


Figura 5. Fluidos de trabajo e intervalos de temperatura.

Para obtener la capacidad de transporte de calor de un fluido y poder evaluar su potencial uso, se define entonces el *parámetro de transporte de calor del líquido* P_{ht} , el cual puede expresarse como:

$$P_{ht} = \frac{\rho_l \sigma \kappa}{\mu_l} \quad (8)$$

Donde ρ_l es la densidad del líquido, σ es la tensión superficial, κ el calor de vaporización y μ_l la viscosidad del líquido. La capacidad de transporte del tubo de calor es proporcional a P_{hb} si las siguientes condiciones se cumplen:

1. La caída de presión de vapor es despreciable
2. El régimen de flujo del líquido en el capilar es laminar
3. La carga hidrostática en el líquido es despreciable
4. La máxima tasa de transferencia de calor está determinada por el límite de bombeo capilar

Estas condiciones se satisfacen frecuentemente para tubos de calor que operan a temperaturas inferiores y cercanas a las ambientales, por lo que es práctica común utilizar los intervalos de temperatura reportados como punto de partida para el diseño de un tubo de calor.

1.3.3 Perfiles de temperatura en el tubo de calor

El tubo de calor, como se ha mencionado anteriormente, es un dispositivo cuya temperatura es prácticamente igual en cualquier punto en su interior. Sin embargo, existen pequeñas diferencias de temperatura que son ocasionadas por la entrada y salida de calor, así como caídas de temperatura a través de las paredes del tubo, capilar y la interfase líquido vapor. La parte externa de la zona del condensador es la zona más caliente del tubo de calor, ya que es la que está en contacto directo con el medio de calentamiento. Seguida de ésta, el capilar, cuya temperatura es ligeramente menor debido a la caída de temperatura a través de la pared del tubo. La interfase

líquido vapor tiene una temperatura aún menor, aunque la resistencia térmica a través de esta interfase es generalmente muy pequeña y puede despreciarse, a menos que el flux de calor en el evaporador sea muy grande. La pared externa del condensador es la zona mas fría del tubo de calor, debido a la resistencia del capilar aunada con la de la pared. La temperatura interna en el tubo de calor es función únicamente de la temperatura, ya que el vapor del tubo de calor se encuentra saturado, por lo que el gradiente de temperatura axial puede determinarse a partir de la caída de presión axial. En la mayoría de los casos, la magnitud de la caída de temperatura de un extremo al otro se controla a través de la caída de presión, procurando que ésta no exceda el 1%. Como puede observarse, la mayor parte de la resistencia térmica que ofrece un tubo de calor es ofrecida por la pared del tubo y el capilar.

1.3.4 Perfiles de presión en el tubo de calor

La capacidad de transporte de un tubo de calor está altamente influenciada por los gradientes de presión que ocurren dentro del tubo. Existen dos gradientes de presión, uno del líquido y otro del vapor. En el caso del vapor, el vapor generado sufre un cambio tanto en flujo másico como en velocidad, iniciando ambos valores en cero al inicio del evaporador y aumentando conforme se acerca a la salida del evaporador. Debido al desplazamiento de vapor a través del interior del tubo, se genera una caída de presión a causa de la fricción a la que se somete el vapor. Al mismo tiempo que el vapor aumenta su velocidad, sufre un aumento en su momentum. Este aumento de momentum genera una caída de presión adicional, que se conoce como *caída de presión por momentum*. Cuando el vapor ha salido por completo de la región del evaporador entra en la sección adiabática del tubo, una región en la que no existe

transferencia de calor hacia fuera o dentro del tubo, por lo que la única caída de presión que sufre el vapor en esta región es debida a los efectos de la fricción. Al llegar el vapor a la zona de condensación, su flujo másico comienza a disminuir, a causa de que parte del vapor se condensa, así como su velocidad, hasta llegar a cero al final de la sección del condensador. El momentum, al ser función directa de la velocidad, desaparece, lo que ocasiona una elevación de la presión debida al momentum, dentro del condensador. Si esta elevación de presión es mayor a la pérdida de presión por fricción, entonces se tendrá un aumento neto en la presión del condensador. Como puede observarse, las pérdidas de presión en un tubo de calor se deben principalmente a los efectos de fricción y cambio de momentum.

El líquido fluye en dirección opuesta al vapor, dentro del capilar y a través de éste hasta llegar nuevamente al evaporador. El comportamiento el gradiente de presión en el líquido es parecido al del vapor, con la diferencia que debido a las bajas velocidades del líquido, los efectos del cambio de momentum son muy pequeños y generalmente se desprecian para fines prácticos. La caída de presión del líquido a través del capilar es fuerte función de las características de flujo de los canales del capilar por el cual circula, de manera análoga al flujo en tuberías, si fluye por un canal muy estrecho, la resistencia al flujo será alta, lo que ocasionará una caída de presión elevada, en cambio, si el canal es amplio, la caída de presión disminuirá. Si el capilar es poroso, es probable que debido a la estructura del capilar exista mucha resistencia al flujo, ocasionando una gran caída de presión. De la misma manera, si el líquido fluye a través poros, es probable que, debido a la baja velocidad y alta resistencia, el régimen de flujo sea laminar. En cambio, al fluir por capilares de canales, puede que el régimen sea laminar en una región del tubo y turbulento en otra.

1.3.5 Uso actual de la tecnología de tubos de calor

El tubo de calor se desarrolló inicialmente para ser utilizado en aplicaciones espaciales, debido a que se requería de un dispositivo para rechazo de calor con una capacidad elevada, sin partes móviles, altamente confiable y que pudiera operar en condiciones de ingravidez. La primera aplicación para la cual estuvo destinado el tubo de calor fue para el rechazo de calor de un reactor nuclear hacia el espacio, por radiación. Posteriores esfuerzos en su desarrollo le permitieron incursionar en aplicaciones terrestres, donde se le utilizó para aplicaciones de calentamiento, acondicionamiento de aire y ventilación (HVAC). Actualmente, se le puede encontrar en aplicaciones como: hornos de secado de pinturas automotrices, hornos de pan, secadores textiles y de papel, recuperación y prevención de contaminación por calor, entre otras. La mayor cantidad de aplicaciones industriales del tubo de calor existe en los Estados Unidos de América y en el Reino Unido, donde la mayoría de estas aplicaciones se basan en la recuperación de calor gas-gas; esto quiere decir que se recupera calor de una corriente gaseosa para calentar otra corriente gaseosa. Como un ejemplo muy ilustrativo, se menciona un sistema de recuperación de calor (Reay, 1979) en el cual se extrae calor de una ramificación de la corriente de gases de salida de un horno, el cual emite 17,000 m³/h de gases a una temperatura de 150°C, y con esto se calienta una corriente de gas, con un flujo de 11,390 m³/h, de 11°C a 100°C, para introducir al gas al horno a una temperatura alta. Este esquema de operación se muestra en la figura 6.

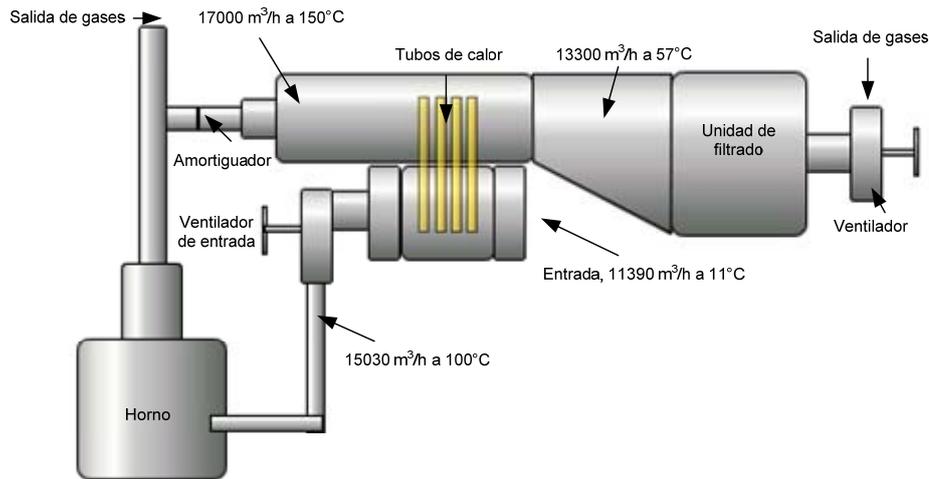


Figura 6. Esquema común de operación de los tubos de calor.

En cuanto a las temperaturas de operación, las instalaciones comunes de tubos de calor no exceden los 400°C ; esto se debe a las limitaciones que implica el uso de un fluido de trabajo. El principal problema es la selección de un fluido de trabajo con una alta capacidad calorífica, para que transporte grandes cantidades de calor al evaporarse y condensarse, y una temperatura de operación cercana a la del proceso, así como ciertas características químicas que eviten que dicho fluido se degrade, reaccione con las paredes u otras piezas del tubo de calor o simplemente se vuelva inestable. Esta combinación de características es difícil de balancear, por lo que generalmente se tiene que sacrificar alguna cualidad en la elección de un fluido, como por ejemplo, elegir un fluido con baja capacidad calorífica, pero que pueda operar a altas temperaturas. Como ejemplo, existe un sistema peculiar: tubos de calor que operan con metales líquidos, en específico con mercurio. Se tienen ventajas como la operación a altas temperaturas y una buena interacción con el material que conforma al tubo (acero inoxidable en este caso), y al añadir cierta cantidad de yodo, se reduce

la viscosidad del fluido, lo cual permite usarlo a temperaturas de hasta 600 °C. Sin embargo, existe el inconveniente de que el mercurio es un material altamente tóxico y además, tiene un bajo calor latente. Otros fluidos de trabajo utilizados comúnmente son los freones, aceites térmicos como el Dowtherm A, agua y difenil; freones para las aplicaciones más frías, agua en las de temperatura media y difenil en las aplicaciones más calientes. Actualmente existe mucha presión por parte de las industrias para el desarrollo de fluidos de trabajo que cumplan con todas las características deseables. Otra limitante en el desarrollo de los tubos de calor son las características que debe tener el material del que está formada su estructura. Para temperaturas cercanas a los 1,500°C (las más altas en los gases de combustión en procesos industriales) se tiene ya un sistema de tubos de calor, el cual está formado por tubos compuestos de metales refractarios, como el niobio y tantalio. Sin embargo, otro avance reciente en la construcción de los tubos es la fabricación de tubos de calor de cerámica. Este avance aumenta en suma medida las aplicaciones para dichos equipos, ya que la cerámica puede soportar temperaturas altas. Sin embargo, existe un problema, ya que la cantidad de fluidos de trabajo cuyo uso es posible disminuye drásticamente con el aumento en la temperatura de operación. A temperaturas muy altas, sólo dos fluidos de trabajo han sido probados exitosamente: el litio y el sodio (en estado líquido y gaseoso). La dificultad radica en que el litio reacciona con las cerámicas, y si se usa en conjunto con un tubo de cerámica, tarde o temprano todo o gran parte del litio habrá reaccionado con las paredes del tubo. Una solución aplicada a este problema, desarrollada en Los Álamos, Nuevo México, fue cubrir la parte interna del tubo de cerámica con un metal refractario, mediante deposición química de vapor (CVD).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema de tubos de calor para recuperación de calor, capaz de operar en condiciones de fluxes altos.

1.4.2 Objetivos específicos

- Construcción de un banco de pruebas para tubos de calor.
- Evaluar el efecto del ángulo de inclinación α en el flux radial de calor.
- Evaluar el efecto de la composición del fluido de trabajo en el flux radial de calor.
- Determinar el efecto de la estructura capilar en el flux radial de calor.
- Determinar la configuración del tubo de calor que transporte el mayor flux radial de calor.

1.5 Justificación

Según Reay (1979), la energía requerida por los hornos industriales equivale al 12% del consumo energético bruto de los Estados Unidos de Norteamérica, y el 20% de esta energía se pierde en forma de calor. Se estima que un ahorro de 4×10^9 J por año sería posible con un sistema efectivo de recuperación de calor. De acuerdo con la EPA, en los asentamientos humanos cercanos a complejos industriales, o en comunidades urbanas, se presenta el fenómeno de la "isla caliente". Este ocurre cuando las modificaciones en la vegetación, generalmente ocasionadas por el hombre, la construcción de estructuras altas y calles estrechas se unen a la excesiva emisión de calor de desecho, producto de la actividad industrial. Esto ocasiona que en algunas

comunidades urbanas en los EEUU pueda existir un incremento en la temperatura ambiente de hasta 5.6 °C, comparado con el de las comunidades rurales. Si se logra disminuir la cantidad de calor de desecho que la industria emite, se puede ayudar a disminuir estos problemas y a mejorar la calidad de vida de las personas que habitan en estas comunidades. El desarrollo de la tecnología de tubos de calor podría ayudar a solucionar el gran problema de la gestión del calor de desecho.

Un aspecto importante en la aplicación de cualquier nueva tecnología a nivel industrial es la seguridad: y es aquí donde los tubos de calor ofrecen otra ventaja. Las únicas oportunidades para una falla en estos dispositivos son la falla estructural del tubo, lo cual es altamente improbable, ya que las presiones de trabajo de estos dispositivos son generalmente las presiones comunes de operación en procesos industriales típicos. Las consideraciones de seguridad que se deben aplicar son: la ruptura de un tubo de calor liberaría el fluido de trabajo que contiene el mismo. En muchos casos, el fluido es inerte y poco tóxico, mientras que en otros casos puede ser explosivo. En el caso de utilizar metales líquidos, se tiene el riesgo de daño al ambiente si este material escapa del interior de los mismos. Las regulaciones legales actuales en los EEUU consideran, legalmente hablando, a los tubos de calor bajo la clasificación de "tanque a presión", y en el Reino Unido, por ejemplo, a los tubos de calor cuyo fluido es agua, se les clasifica como "generador de vapor". Esta clasificación requiere la inspección periódica de los tubos de calor como si se tratara de los equipos antes mencionados.