

2. METODOLOGÍA

2.1 Límites de la transferencia de calor [1]

La transferencia de calor en un tubo de calor no puede exceder ciertos límites impuestos por las características de los fenómenos que ocurren en él. En esta sección se analizarán los límites de transferencia de calor dentro de los que un tubo de calor opera, estos límites se utilizan para determinar cual es la capacidad máxima de transferencia de calor para un tubo de calor de ciertas características conocidas como volumen, tipo de capilar, fluido de trabajo y temperaturas de operación, entre otros.

2.1.1 Límite de bombeo capilar

En toda la longitud del tubo de calor la presión de vapor es siempre mayor a la presión del líquido, a excepción de un solo punto al final del condensador, como se explicó anteriormente. Para que esta diferencia de presión pueda mantenerse estable, es necesario que el efecto sea compensado por una fuerza adicional, la cual es la presión capilar existente en la interfase líquido vapor en los poros del capilar, que se expresa mediante la ecuación:

$$\Delta P_c = \frac{4\sigma}{D_c} \quad (9)$$

Donde D_c es el diámetro de curvatura de la interfase líquido vapor en los poros y σ es la tensión superficial. La presión del vapor siempre será mayor a la presión del líquido mientras exista líquido mojando el capilar. La presión capilar es proporcional a la diferencia de presiones que exista entre el líquido y el vapor. En la sección del

evaporador, la diferencia de presión entre el líquido y el vapor es máxima, lo que nos indica que la presión capilar en ese punto también es la máxima. Entonces, la máxima presión capilar en el tubo de calor es igual a la suma de las caídas de presión del líquido y del vapor, lo que da como resultado la ecuación:

$$\Delta P_{vl} = \Delta P_v + \Delta P_l \quad (10)$$

Mientras el valor de ΔP_{vl} no exceda la máxima presión capilar de la cual son capaces los poros del capilar, y cuando $D_c = D_p$, la transferencia de calor se producirá sin ningún problema y no se excederá el límite de bombeo capilar. Para efectos prácticos, es de mayor utilidad expresar las caídas de presión para líquido y vapor como funciones del calor añadido al tubo. Esto puede realizarse desarrollando una expresión que relacione las caídas de presión con los flujos máxicos de vapor, función de la carga térmica Q y del calor de vaporización del fluido. Si el valor de ΔP_{vl} es igual a la máxima capacidad de presión capilar de los poros, el tubo de calor estará operando en el límite de transporte de calor por capilaridad. Si se excede este límite, impuesto principalmente por las características del fluido y del capilar, la interfase líquido vapor desaparecerá y el capilar se secará, deteriorando el funcionamiento del tubo de calor, lo que ocasionará que la sección del evaporador se sobrecaliente.

2.1.2 Límite de ebullición

En la operación del tubo de calor debe evitarse que el líquido en el capilar entre en ebullición, principalmente por dos razones. La primera es que la presencia de burbujas dentro del capilar ocupa el espacio que de otra forma sería utilizado por el líquido para desplazarse, incrementando la resistencia al flujo del líquido a través del capilar, en consecuencia aumentando la caída de presión en el líquido. Esto ocasiona

que el límite de bombeo capilar disminuya, reduciendo la capacidad máxima de transferencia de calor por capilaridad. La segunda razón es la formación de una capa de vapor aislante (debido a la ebullición en piscina) que actúe como un aislante y aumente la resistencia a la transferencia de calor, lo que ocasionará que la estructura del tubo se sobrecaliente al no poder ceder el calor ganado, resultando en un daño mecánico o incluso la ruptura del tubo de calor. A causa de todo esto, la operación del tubo de calor debe realizarse por debajo de las condiciones que favorecen la ebullición, y a este límite se le conoce como *límite de ebullición*. El límite de ebullición depende de factores como el sobrecalentamiento, saturación, distribuciones de temperatura, transferencia de masa y calor en la interfase y presión y sitios de nucleación.

2.1.3 Límite de acarreamiento

En el interior del tubo de calor, los flujos de vapor y líquido ocurren en direcciones contrarias. El vapor, viajando a alta velocidad, ejerce una fuerza de arrastre sobre el líquido. A esta fuerza se opone la tensión superficial del líquido. Mientras mayor sea la tasa de transferencia de calor, las velocidades de vapor y líquido aumentarán, lo que ocasiona un incremento en la fuerza de arrastre. Si esta fuerza excede cierto valor, el vapor arrastrará consigo diminutas gotas de líquido hacia la sección del condensador, lo que interrumpirá o disminuirá el flujo de retorno del líquido. Al ocurrir esto, el evaporador eventualmente se secará, lo que interrumpirá el funcionamiento del tubo de calor, y si no se interrumpe el suministro de calor, el tubo de calor podría sobrecalentarse y dañarse. El acarreamiento ocurre al final de la sección del evaporador, debido a que en esta zona la velocidad de vapor es máxima.

Las condiciones a las cuales este fenómeno ocurre pueden expresarse en función de la tasa de transferencia de calor, por lo que el límite de acarreamiento generalmente se representa mediante una tasa de transferencia de calor o un flux de calor axial. Debido a que la fuerza de arrastre ejercida por el líquido es proporcional a la superficie del líquido en los poros, al disminuir el diámetro de éstos se reduce la fuerza de arrastre, lo que eleva el límite de acarreamiento. Entonces, el diámetro de poro y el límite de acarreamiento tienen una relación de proporcionalidad inversa, y si se desea aumentar el límite de acarreamiento, pueden modificarse las características del capilar.

2.1.4 Límite sónico

En la sección del evaporador, existe una generación continua de vapor. Al acercarse al final de la zona del evaporador, la velocidad del vapor saliente se incrementa, debido a que existe una mayor cantidad de vapor. La velocidad del vapor llega a su máximo valor al final de la longitud del evaporador. La velocidad del vapor es proporcional a la velocidad de generación de vapor. Si la velocidad del vapor llega a ser igual a la velocidad sónica, el flujo de vapor no puede incrementarse más, a menos que se incremente la temperatura del vapor. Esto sucede comúnmente en la operación del tubo de calor. Debido a que el límite sónico es directamente proporcional a la temperatura, al alcanzar el límite sónico, el tubo de calor puede seguir operando, ya que al aumentar ligeramente la temperatura, se genera un nuevo límite sónico, mayor al anterior, lo que permite que el tubo de calor continúe funcionando, mientras no se supere la temperatura a la que puede operar el material de construcción del tubo. Existe un aumento muy grande del momentum del vapor al viajar a velocidades

sónicas en dirección al condensador, lo que conlleva una caída de presión elevada. Debido a esto, y a que el vapor se encuentra saturado, la temperatura del vapor disminuye, y en algunos tubos de calor con metales líquidos llega a descender hasta 56°C. Esta disminución de temperatura debe evitarse, si es que se pretende que el tubo de calor opere isotérmicamente. Es por esto que, en la mayoría de los casos, se opera a velocidades de vapor muy por debajo de la velocidad sónica, y en términos del flux de calor, se opera con fluxes axiales menores al 50% del límite sónico.

1.1 Características y consideraciones físicas

2.2.1 Materiales de construcción

Es de suma importancia la elección correcta de materiales de construcción del tubo de calor, tanto como para el contenedor (la parte externa del tubo) como para el capilar. Los materiales a utilizar deben ser compatibles con el fluido de trabajo del tubo, en todo el intervalo de temperaturas en el cual se operará. El material de construcción no debe reaccionar con el fluido, ni debe disolverse en grandes cantidades en él. Si esto llegara a ocurrir, el funcionamiento del tubo de calor se vería afectado y se disminuiría su efectividad enormemente. También se desea que el material de construcción tenga una alta conductividad térmica, para evitar altas resistencias a la transferencia de calor.

Si el material del tubo de calor llegase a reaccionar con el fluido de trabajo, se generarían compuestos extraños, los cuales muy probablemente tendrían efectos negativos sobre el funcionamiento del tubo. Si se llega a generar un gas incondensable, como hidrógeno, este gas se acumularía en el interior del tubo,

ocupando el espacio destinado al vapor del fluido de trabajo, disminuyendo o tal vez interrumpiendo el funcionamiento del dispositivo. En el caso de sólidos, éstos podrían obstruir los poros del capilar o añadir resistencia a la transferencia de calor. El potencial de electrodo de los metales también tiene un papel importante en la compatibilidad química de los materiales. Un ejemplo claro es la incompatibilidad existente entre el aluminio y el agua; el aluminio, debido a su posición relativa en la serie electromotriz (tabla 1), tiende a desplazar al hidrógeno presente en los compuestos, lo que liberaría a este gas incondensable, que ocuparía el espacio del vapor, inutilizando al tubo de calor.

Elemento	Potencial de electrodo, (V)
Al	-1.34
Cr	-0.6
Fe	-0.44
Ni	-0.22
H	0
Cu	0.34

Tabla 1. Serie electromotriz [1].

Este fenómeno no ocurrirá si se utiliza cobre como material de construcción, ya que debido a su posición en la serie, el cobre no puede desplazar al hidrógeno. La compatibilidad química de fluidos de trabajo comunes y materiales de construcción obedece también a las temperaturas que pueden soportar tanto el fluido de trabajo como el material. Otra propiedad importante para determinar la compatibilidad es la solubilidad del material de construcción en el fluido de trabajo, ya que prácticamente todos los sólidos y gases son solubles en líquidos, aunque sea en cantidades muy pequeñas. El condensado del fluido de trabajo es altamente puro, y debido a esto, su

capacidad para disolver sólidos y gases se encuentra en un punto máximo. Esto significa que, al tocar los componentes del tubo y del capilar, el condensado disuelve una parte muy pequeña de éstos y los arrastra consigo al evaporador. Si este fenómeno se repite muchas veces, en el evaporador se acumularán grandes cantidades de material sólido disuelto e impurezas, lo que puede ocasionar taponamiento en el capilar y entorpecer el retorno del líquido al evaporador. Es de suma importancia que en la fabricación del tubo de calor se realice un esfuerzo máximo para disminuir en medida de lo posible la presencia de impurezas, tanto sólidas (partículas de polvo, rebabas de metal) líquidas (solventes, grasas, material de limpieza) y gaseosas (gases incondensables) para que la vida útil del tubo de calor sea mayor. Debido a que el tubo de calor generalmente se sella herméticamente o se suelda al finalizar su construcción, la remoción de impurezas es una labor que debe realizarse en las primeras etapas de la construcción. En cuanto a la compatibilidad del material del contenedor con el material del capilar, es preferible que ambos sean iguales, sin embargo esto no siempre es posible. En la tabla 2 se muestran los materiales de construcción recomendados para fluidos de trabajo comunes.

Fluido de trabajo	Material recomendado	Fluido de trabajo	Material recomendado
Amoníaco	Aluminio	Potasio	Níquel
	Acero al carbón		Acero inoxidable
	Níquel		Inconel
	Acero inoxidable		Titanio
Acetona	Cobre	Litio	Metales refractarios y sus aleaciones
Metanol	Cobre		Niobio - 1% Zirconio
	Acero inoxidable		Molibdeno
Agua	Cobre		TZM Molibdeno
Sodio	Monel	Mercurio	Molibdeno - 13% Rhenio
	Acero inoxidable		Tungsteno
	Níquel		Tungsteno - 26% Rhenio
	Inconel 800		SGS Tantalio
	Hastelloy X		Acero inoxidable
	Haynes 188		Tungsteno - 26% Rhenio
	Molibdeno		
Tungsteno	Plata		

Tabla 2. Materiales de construcción y fluidos de trabajo recomendados [1].

2.2.2 Características del capilar

El capilar es un elemento crucial para el funcionamiento del tubo de calor. Gracias al capilar el fluido de trabajo líquido puede regresar sin problemas al evaporador después de condensarse, sin ser acarreado por el vapor, y es en el capilar donde el fluido se evapora. Para que el tubo de calor opere correctamente, el capilar debe reunir ciertas características, dependientes de las condiciones de operación. Es preferible un tamaño de poro lo mayor posible, para disminuir la resistencia al flujo del líquido, mientras que si el tamaño del poro es demasiado grande, no existirá la suficiente tensión superficial que evite que el líquido sea arrastrado por el vapor a altas velocidades. Debido a la gran cantidad de aplicaciones, intervalos de temperatura, presiones y fluidos que pueden utilizarse, se han desarrollado numerosos tipos de capilar. Actualmente, existen tres principales configuraciones de capilar: el capilar de una sola capa, capilar de dos capas y capilar de arteria. El capilar puede estar

fabricado a partir de fibras metálicas, mallas, polvos, o puede formarse a partir de surcos o ranuras en el material del tubo. En el caso de las fibras y polvos, estos se someten a un proceso conocido como *sinterizado*, en el cual se colocan las fibras o polvos en la posición deseada y se aumenta la temperatura hasta llegar a las cercanías del punto de fusión del material. Posteriormente se reduce la temperatura hasta la ambiente, y como consecuencia las partículas de fibra o polvo se adhieren entre sí para formar una estructura sólida. En la figura 8 se muestran las estructuras de capilar más comunes. A continuación se describirán brevemente estas configuraciones, ilustradas en la figura 7, así como las situaciones en las que se utilizan.

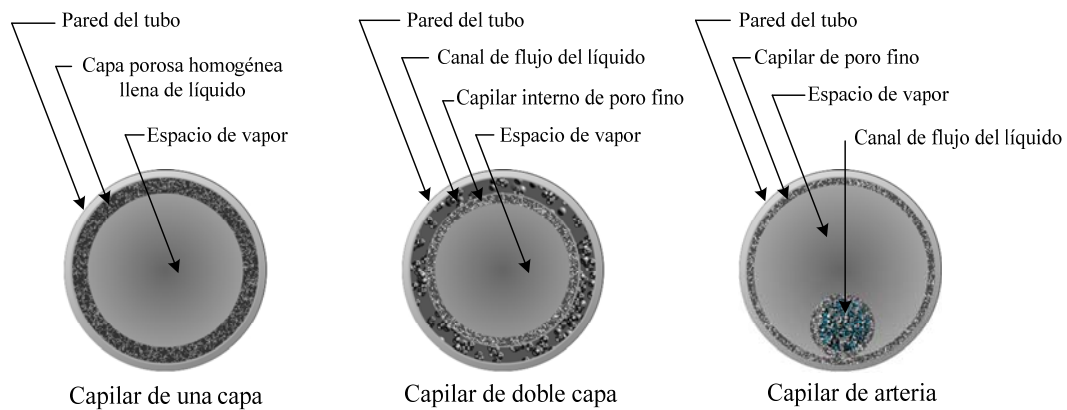


Figura 1. Configuraciones de estructura capilar.

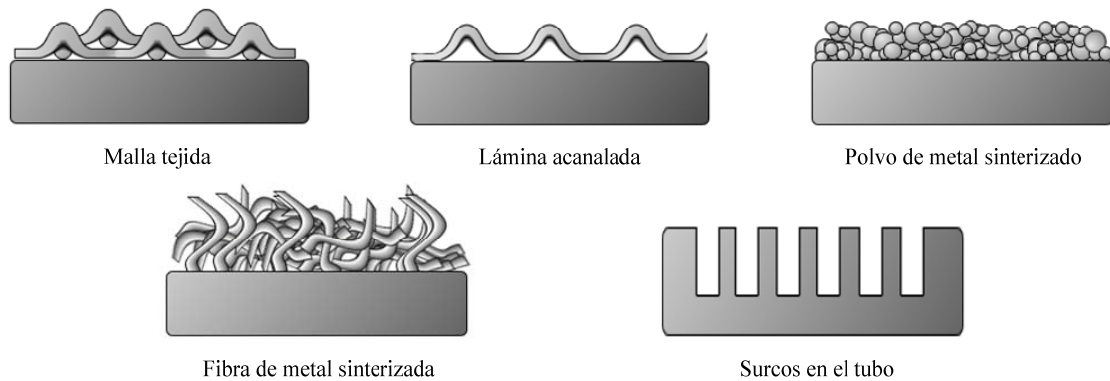


Figura 2. Estructuras capilares más comunes

2.2.3 Capilar de una sola capa

El capilar de una sola capa es el más sencillo, pues se compone solamente de una capa de material poroso homogéneo. Este material generalmente es fibra o malla metálica. El principal inconveniente que se tiene al utilizar un solo material es que, en numerosas ocasiones, los requerimientos de tamaño de poro son contradictorios, ya que el límite de bombeo capilar sugiere un tamaño de poro grande, mientras que el límite de acarreamiento solicita uno lo más pequeño posible. En estas circunstancias, es difícil satisfacer ambos límites, por lo que al utilizar un solo tamaño de poro, la capacidad de transporte de calor a la que se opera casi nunca es la máxima posible. Para solucionar este problema, surgen otras configuraciones, como la del capilar de dos capas.

2.2.4 Capilar de dos capas

En el capilar de dos capas se soluciona el problema que ocurre en el capilar de una capa. El capilar externo (el que se encuentra en contacto con la pared del tubo)

puede tener un tamaño de poro independiente al límite de acarreamiento, ya que, el capilar interno, cuyos poros son más pequeños que los del externo, permite desarrollar una mayor tensión superficial, lo que permite que el límite de acarreamiento sea mucho mayor. Esto ocurre de manera independiente a lo que sucede en el capilar externo, donde el tamaño de poro puede ser muy grande para que la resistencia al flujo del líquido sea mínima. Incluso, se puede prescindir del capilar externo, y sólo tener un capilar de forma anular, dejando un espacio para flujo de líquido entre la pared del tubo y el capilar anular. Para esto pueden usarse sujetadores, colocados a intervalos regulares, o bien, puede optarse por ranuras en la superficie interna del tubo. Sin embargo, las ranuras deben ser más gruesas que el canal anular para que retengan la suficiente área de flujo. Cuando las ranuras son lo suficientemente delgadas, éstas pueden ejercer una adecuada presión capilar como para prescindir del capilar anular, lo que se transformaría un tubo de calor con surcos axiales, aunque la máxima presión capilar que podría desarrollar un surco es sólo la mitad de la que puede desarrollarse en un poro, ya que el fluido alojado en un surco sólo se curva longitudinalmente.

2.2.5 Capilar de arteria

Cuando se requiere que el espesor del capilar sea lo menor posible, para reducir la resistencia a la transferencia de calor, el canal de flujo del líquido puede concentrarse en un solo lugar. Esto se logra con la implementación de una *arteria*, que es un canal de forma cilíndrica por el cual fluye el líquido. Para garantizar que no exista acarreamiento, el canal está rodeado por una capa muy delgada de capilar de poro fino, para que exista una gran tensión superficial en sus poros. Al condensarse el

vapor, éste ingresa al delgado capilar externo, y se desplaza a través de él hacia la arteria. En la arteria, el condensado fluye axialmente hacia el evaporador, donde fluye nuevamente hacia el capilar exterior y se evapora. Al no ser un factor de importancia en cuanto a la resistencia térmica, el tamaño de la arteria puede modificarse libremente, teniendo en cuenta que un tamaño muy grande reduciría la presión capilar que se desarrolla en el interior de la arteria, y que es la responsable de que exista circulación de fluido dentro de ella. Este tipo de capilar se utiliza cuando la gran diferencia de temperaturas entre la pared y el líquido originan ebullición, ya que al eliminar el uso de un capilar grueso esta diferencia de temperaturas disminuye.