

4. EXPERIMENTACIÓN

4.1 Diseño de experimentos

El propósito de la experimentación es determinar una combinación de condiciones de operación para el tubo de calor y fluido de trabajo que permitan transferir calor en un flux radial elevado. Los parámetros que pueden manipularse para la operación de un tubo de calor son: composición del fluido de trabajo, orientación del tubo de calor, presión de operación del fluido de trabajo, tamaño de poro del capilar, área de intercambio de calor, entre otros. Sin embargo, sólo algunos de estos parámetros pueden manipularse con facilidad, ya que, por ejemplo, para manipular el área de intercambio térmico del equipo experimental es necesaria una modificación sustancial del mismo. Entonces, los parámetros que se manipularán para la experimentación son tres:

1. Composición del fluido de trabajo
2. Ángulo de inclinación con respecto a la horizontal (α)
3. Presión de operación del fluido de trabajo

4.1.1 Justificación de los niveles

Los niveles seleccionados para cada una de las variables manipuladas en la experimentación se sustentan en los siguientes hechos:

Composición del fluido de trabajo: la capacidad de transferencia de calor de un tubo de calor es función del fluido de trabajo a utilizar, ya que ésta depende de las propiedades del fluido, como viscosidad, calor latente de vaporización,

conductividad térmica, entre otras. Las composiciones de fluido de trabajo con las cuales se experimentará son: mezclas etanol-agua al 5% y 16% (p/p), acetona, isopropanol y metanol. La acetona, isopropanol y metanol son fluidos que se utilizan comúnmente en aplicaciones de tubos de calor [5] [6]. La selección de las composiciones etanol-agua se basa en el hecho de que, según Reynoso (2005), para la composición de 5% se presenta el menor ángulo de contacto ϕ_{is} , mientras que el mayor ángulo se presenta para la mezcla de 16%. Silverstein (1992) menciona que los fluidos de trabajo altamente mojantes y altamente no mojantes son de especial interés para utilizarse en tubos de calor. Dado que la mojabilidad es una función inversa del ángulo de contacto ϕ_{is} , se estudiarán estas dos composiciones de la mezcla etanol-agua.

Ángulo de inclinación con respecto a la horizontal: según Reay (1979), el ángulo de inclinación con respecto a la horizontal tiene un efecto importante en la capacidad de transferencia de calor de un tubo de calor. Esto se debe al efecto de la aceleración gravitacional sobre el fluido de trabajo. Se eligen 3 niveles para esta variable, 0° (tubo de calor totalmente horizontal), 45° y 90° (condensador directamente sobre evaporador).

Presión interna del tubo de calor: la presión interna del tubo de calor al momento de iniciar su operación tiene un efecto sobre la temperatura a la cual el fluido de trabajo entra en ebullición. Esto también tiene un efecto sobre la cantidad de fluido de trabajo que se vaporiza y condensa. Se eligen dos niveles para esta variable: presión atmosférica y la presión de vacío más baja que se pueda lograr con la bomba de vacío. Es práctica común retirar la mayor cantidad posible de aire y gases no condensables del interior del tubo de calor, los cuales

disminuirían las prestaciones del equipo. Otra razón para este nivel es asegurar que la totalidad del fluido de trabajo se vaporice aunque la caída de temperatura a través de la pared del tubo sea muy alta. Esto se logra obteniendo las presiones de equilibrio líquido vapor para los fluidos a una temperatura de 60°C, utilizando el simulador de procesos AspenOne©. A partir de la simulación se obtiene que una presión de vacío de 50 kPa es suficiente para que todos los fluidos de trabajo a utilizar se vaporicen a 60°C.

El plan de experimentación consta de 3 fases y se describe a continuación:

1. *Experimentación con tubo de calor sin estructura capilar.* tiene como objetivo analizar el comportamiento del tubo de calor sin la estructura capilar, para posteriormente compararlo con el desempeño del tubo con la estructura capilar. Experimentación con tres niveles para el ángulo de inclinación α y dos niveles para la presión de operación. Se experimenta para dos distintas composiciones de fluido de trabajo (etanol/agua 5% y 16% p/p). Los experimentos se enlistan a continuación.

Experimento	Composición	α	P
A	EtOH-H ₂ O, 5% (p/p)	0°	atm
B	EtOH-H ₂ O, 5% (p/p)	0°	vac
C	EtOH-H ₂ O, 5% (p/p)	45°	atm
D	EtOH-H ₂ O, 5% (p/p)	45°	vac
E	EtOH-H ₂ O, 5% (p/p)	90°	atm
F	EtOH-H ₂ O, 5% (p/p)	90°	vac
G	EtOH-H ₂ O, 16% (p/p)	0°	atm
H	EtOH-H ₂ O, 16% (p/p)	0°	vac
I	EtOH-H ₂ O, 16% (p/p)	45°	atm
J	EtOH-H ₂ O, 16% (p/p)	45°	vac
K	EtOH-H ₂ O, 16% (p/p)	90°	atm
L	EtOH-H ₂ O, 16% (p/p)	90°	vac

Tabla 1. Descripción de los experimentos F1.

2. *Experimentación con tubo de calor con estructura capilar:* los resultados de esta experimentación se comparan con los datos obtenidos a partir de la fase experimental anterior, para determinar el efecto que la estructura capilar tiene en la operación del tubo de calor. Experimentación con tres niveles para el ángulo de inclinación α y dos niveles para la presión de operación. Se experimenta para dos composiciones de fluido de trabajo (etanol/agua 5% y 16% p/p). Los experimentos se muestran en la siguiente tabla.

Experimento	Composición	α	P
M	EtOH-H ₂ O, 5% (p/p)	0°	Atm
N	EtOH-H ₂ O, 5% (p/p)	0°	Vac
Ñ	EtOH-H ₂ O, 5% (p/p)	45°	Atm
O	EtOH-H ₂ O, 5% (p/p)	45°	Vac
P	EtOH-H ₂ O, 5% (p/p)	90°	Atm
Q	EtOH-H ₂ O, 5% (p/p)	90°	Vac
R	EtOH-H ₂ O, 16% (p/p)	0°	Atm
S	EtOH-H ₂ O, 16% (p/p)	0°	Vac
T	EtOH-H ₂ O, 16% (p/p)	45°	Atm
U	EtOH-H ₂ O, 16% (p/p)	45°	Vac
V	EtOH-H ₂ O, 16% (p/p)	90°	Atm
W	EtOH-H ₂ O, 16% (p/p)	90°	Vac

Tabla 2. Descripción de los experimentos F2.

3. *Experimentación con fluidos de trabajo comunes:* al concluir la experimentación con las composiciones de fluido de trabajo basados en la mezcla etanol-agua, se efectuarán experimentos con los mismos niveles para las variables α y presión, utilizando distintos fluidos que se reportan comúnmente en la literatura, con el fin de comparar su desempeño con el de las mezclas etanol-agua. El listado de experimentos se presenta a continuación:

Experimento	Fluido	α	Presión
X	Acetona	0°	atm
Y	Acetona	0°	vac
Z	Acetona	45°	atm
AA	Acetona	45°	vac
AB	Acetona	90°	atm
AC	Acetona	90°	vac
AD	Isopropanol	0°	atm
AE	Isopropanol	0°	vac
AF	Isopropanol	45°	atm
AG	Isopropanol	45°	vac
AH	Isopropanol	90°	atm
AI	Isopropanol	90°	vac
AJ	Metanol	0°	atm
AK	Metanol	0°	vac
AL	Metanol	45°	atm
AM	Metanol	45°	vac
AN	Metanol	90°	atm
AÑ	Metanol	90°	vac

Tabla 3. Descripción de los experimentos F3.

4.2 Montajes

El montaje que se utilizará para la experimentación se muestra en la figura 12. El tubo de calor cíclico y el equipo de prueba se instalan para poder determinar la capacidad de transferencia de calor de un tanque a otro.

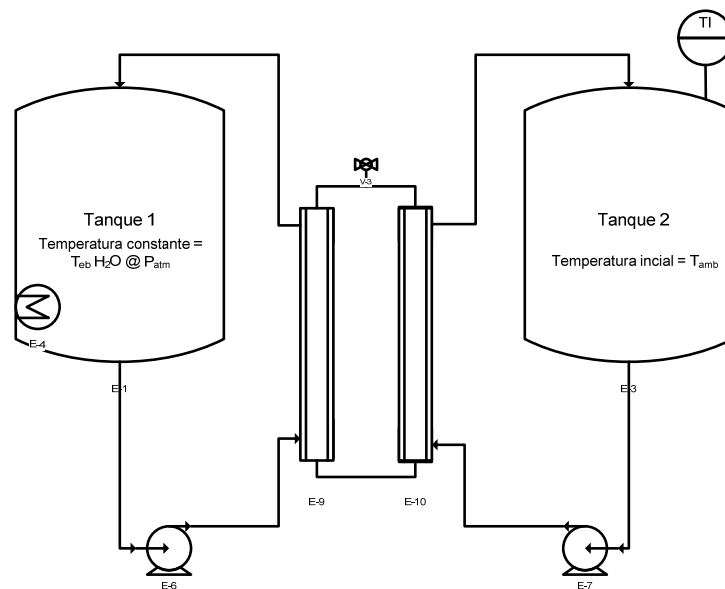


Figura 1. Diagrama de flujo del equipo experimental.

El montaje experimental consiste en dos tanques de acero inoxidable 304, con tapas del mismo material, de $8 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ de volumen, dos bombas centrífugas marca Pedrollo® con una potencia de 340 W, una resistencia eléctrica de 300 W. El transporte de fluidos se realiza mediante mangueras de nylon y mangueras de goma con abrazaderas metálicas. La tubería utilizada para el tubo interno (tubo de calor cíclico) es de acero inoxidable 316, con un diámetro interno D_i de 0.006 m y un diámetro externo D_o de 0.007 m. El tubo externo tiene un D_i de 0.0158 m y un D_o de 0.0213 m y a través de éste se realiza el flujo anular de los fluidos fuente y pozo de calor. La estructura capilar está compuesta por malla de acero inoxidable número 120. Se coloca cubriendo la pared interna del tubo de calor, cuidando que haga contacto y cubra toda la pared. Se introduce cuidadosamente en la sección del evaporador del tubo. Ambos tubos se encuentran recubiertos por un aislante térmico con cobertura metálica. Se instala un termopar tipo T (cobre-constantan) con cubierta de acero en uno de los pozos tanque 2, con el fin de medir la temperatura del agua en este tanque. El conector de dicho termopar se conecta a un indicador de temperatura Cole-Parmer® Digi-Sense Dual, modelo 91100-40 con una resolución de 0.1°C , con incertidumbre de $\pm 0.4^\circ\text{C}$. Se ha estimado que el flux de calor incidente en el evaporador, dado que el flujo másico de agua es de 0.72 L/s y suponiendo una caída de temperatura de 5°C , es aproximadamente de 2 W/cm^2

4.3 Métodos

El método a seguir para la determinación del flux radial de calor que emana del condensador del sistema de tubos de calor se realizará tomando lectura de la temperatura del agua contenida en el tanque #2, cada minuto. Una vez efectuada la

corrida experimental, se contará con 20 datos por corrida de $T(^{\circ}C)$ vs. $t(s)$. Inicialmente se registraron datos durante un intervalo de 30 minutos, pero en numerosas corridas la bomba se sobrecalentó al pasar los 20 minutos, por lo que el tiempo de experimentación se redujo a 20 minutos. A partir de estos datos, se calculará el diferencial dT/dt , el cual permitirá, mediante el balance de energía, determinar la tasa de transferencia de calor de un tanque al otro. La ecuación para determinar la tasa de transferencia se muestra a continuación (Ecuación 71):

$$\dot{Q} = m C_p \frac{dT}{dt} \quad (71)$$

Donde Q es el flujo de calor en W , m es la masa de agua a calentar en kg , y C_p es la capacidad calorífica promedio del agua a calentar. Una vez determinada la tasa de transferencia de calor Q , es posible conocer el flux radial si se divide Q entre el área superficial sobre la cual se lleva a cabo la transferencia de calor; en este caso, el área de interés es el área superficial externa del tubo de calor, en el lado del condensador. Cabe señalar que los valores de Q no son constantes a lo largo de una corrida experimental, ya que al ir incrementando la temperatura del tanque 2, la fuerza motriz ΔT se reduce gradualmente, disminuyendo la tasa de transferencia de calor. Es por esto que se considerarán dos valores para Q y por consiguiente para el flux radial: el valor máximo y el valor promedio. El valor máximo se determinará a partir del máximo valor obtenido para dT/dt , mientras que el valor promedio se obtendrá a partir de la media aritmética de todas las observaciones para dT/dt .

4.4 Técnicas

Se adiciona una cantidad de agua suficiente (cercana a los 7 L) de agua al tanque #1. El agua debe cubrir por completo la resistencia eléctrica que se sumerge como medio de calentamiento, para evitar el sobrecalentamiento de la misma y aprovechar al máximo la superficie de intercambio térmico. Una vez que se ha adicionado agua suficiente, el tanque #1 se cierra colocando la tapa y ajustándola con tornillos y tuercas. Se cuenta con orificios en la parte superior que permiten la salida de vapor, para evitar el incremento en la presión interna del tanque. Al tanque #2 se le adiciona una cantidad previamente medida de 3 L de agua destilada a temperatura ambiente. El tanque se cierra, asegurándose de que el termopar se encuentre completamente sumergido en el agua destilada y alejado del centro del tanque, debido a que es posible que se forme un vórtice debido a la succión de la bomba, lo que arrojaría una lectura incorrecta de la temperatura. Una vez cerrado el tanque, se abre la válvula del tubo de calor y se inyecta, con un émbolo de jeringa, una cantidad previamente medida del fluido de trabajo a utilizar. Inmediatamente después de haberlo añadido se cierra la válvula. En el caso de trabajar a presiones de vacío, se conecta una bomba de vacío Cole-Parmer® mediante una manguera de goma a la entrada de la válvula, la cual se abre, se acciona la bomba (con los tubos de calor en posición vertical para evitar que el fluido sea succionado hacia fuera del tubo) y se espera hasta tener la presión deseada. Inmediatamente, se cierra la válvula, se apaga la bomba y se desconecta la bomba de la válvula. Después, se inclina el tubo para que el líquido moje por completo el capilar ubicado en el evaporador. Se enciende la resistencia para comenzar con el calentamiento del agua hasta su punto de ebullición, y cuando la ebullición ha comenzado se enciende la bomba del tanque #1 (para que

todos los elementos del evaporador alcancen el equilibrio térmico con el agua hirviendo), lo que ocasiona que la ebullición se detenga y la temperatura del agua descienda ligeramente. Una vez que se logra el equilibrio, el agua comienza a hervir nuevamente y se toma la temperatura inicial en el tanque #2. Se acciona entonces la bomba #2, y se comienza a contar el tiempo transcurrido. Se registran cada minuto valores para la temperatura en el tanque #2.