

LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS II

GUÍA DE LABORATORIO

SEMESTRE 2010-1

INTERCAMBIADORES DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA

María Claudia Romero; Natalia Ballesteros; Julián Vargas Echeverry

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Calcular los coeficientes totales de transferencia de calor para los intercambiadores de calor de tubos y coraza del laboratorio de operaciones unitarias.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar y operar un intercambiador de calor de tubos y coraza.
- Identificar cada una de las corrientes involucradas en el intercambiador de calor de tubos y coraza.
- Efectuar balances de calor para los intercambiadores que operan como calentador y enfriador y calcular las pérdidas de calor a los alrededores.

TEORÍA & MODELO DE CÁLCULO

INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA

En las industrias de proceso, la transferencia de calor entre dos fluidos casi siempre se lleva a cabo en intercambiadores de calor. El tipo más común es uno en el cual el fluido caliente y el frío no entran en contacto directo el uno con el otro, sino que están separados por una pared de tubos o una superficie plana o curva. La transferencia de calor se efectúa en tres etapas: por convección desde el fluido caliente a la pared o la superficie de los tubos, a través de la pared de tubos o placa por conducción, y luego por convección al fluido frío.

Cuando se manejan flujos y un área de transferencia de calor grandes se usa un intercambiador de tubos y coraza. Los flujos de estos intercambiadores son continuos. Se usan muchos tubos en paralelo con uno de los fluidos circulando en su interior. Los tubos, distribuidos en forma de manojo, están encerrados en una sola coraza y el otro fluido fluye

por el exterior de los tubos, dentro de la coraza. La única desventaja que presenta este tipo de equipos son la presencia de lodos y los requerimientos de flujo de servicio. [1]

En estos intercambiadores se debe tener en cuenta la corrosividad de los fluidos, ya que esto es determinante en el diseño y en la disposición de los fluidos en el equipo, al igual que la caída de presión permitida en el sistema.

En la práctica en el laboratorio siempre se usará un intercambiador de calor que hará las veces de calentador (sección de calentamiento), trabajando en serie con otro intercambiador que hará las veces de enfriador (sección de enfriamiento). A continuación se muestra el manejo matemático para las dos secciones.

Balance De Calor Para La Sección De Calentamiento

En el primer intercambiador se presenta una condensación del vapor que se suministra al sistema proveniente de la caldera, mientras que el agua proveniente de otra reserva es conducida por los tubos para elevar su temperatura. El tipo de calor transferido por el vapor es un calor latente y corresponde a la energía necesaria para cambiar de fase vapor a estado líquido. En este caso, y aunque la coraza está aislada, se tienen en cuenta las pérdidas de calor a los alrededores, de modo que todo el calor cedido por el vapor para condensarse es igual al calor sensible que necesita el agua líquida que pasa por los tubos para aumentar su temperatura, más las pérdidas. Al hacer un balance en este intercambiador de calor obtenemos la expresión:

$$M\lambda = WC_p(T_1 - T_3) + \text{Pérdidas}$$

Donde:

- M Rata másica de condensación del vapor. Se extrae de la trampa.
- λ Calor latente de condensación del vapor a presión de saturación P1.
- W Rata másica de flujo de agua a calentar se obtiene del rotámetro 1 (Q1)
- Cp Calor específico del agua a calentar evaluado en un valor promedio entre las temperaturas T1 y T3.
- T3 Temperatura de entrada del agua fría (Reserva). Temperatura de entrada del fluido de proceso al calentador.
- T1 Temperatura de salida del agua que fue calentada. Temperatura de salida del fluido de proceso del calentador.

En esta expresión, el término de la izquierda equivale al calor latente del vapor y el de la derecha es igual al calor sensible necesario para que el agua líquida aumente su temperatura desde su valor inicial a la entrada del intercambiador T3, hasta su temperatura final T1 a la salida del mismo. Reemplazando los valores en este balance podremos saber si la energía

suministrada por el vapor al condensarse sí es aprovechada totalmente por el agua para calentarse y calcular las pérdidas.

Balance De Calor Para La Sección De Enfriamiento

En esta sección se toma el agua caliente que sale del intercambiador 1 (calentador) y se pasa por los tubos de uno de los 4 intercambiadores disponibles, para enfriarla con agua del acueducto que pasa por la camisa del mismo intercambiador. La ecuación del balance de calor para este intercambiador en estado estable, será:

$$wC_{pr}(T_4 - T_3) + \text{Pérdidas} = WC_p(T_1 - T_2)$$

Donde:

- w Rata másica del fluido refrigerante se obtiene del rotámetro 2 (Q2)
- C_{pr} Calor específico del fluido refrigerante. Valor promedio entre las temperaturas T3 y T4.
- C_p Calor específico del agua caliente evaluado en un valor promedio entre las temperaturas T1 y T2.
- T3 Temperatura de entrada del agua de refrigeración.
- T4 Temperatura de salida del agua de refrigeración.
- T2 Temperatura de salida del agua caliente.

Partiendo de esta expresión para el balance de energía en el intercambiador, podremos saber si todo el calor cedido por el agua caliente es aprovechado por el agua fría. O si hay pérdidas considerables a los alrededores.

Modelo De Cálculo De Los Coeficientes Totales De Transferencia De Calor

El coeficiente total de transferencia de calor “U” se define como el inverso de la resistencia total de transferencia de calor entre el fluido caliente, las paredes de los tubos y el fluido frío.

Calentador

El calor transferido entre el vapor condensante y el agua que se va a calentar también puede ser descrito mediante la ecuación:

$$q = WC_p(T_1 - T_3) = UA_oF_TLMTD$$

$$U = \frac{WCp(T1 - T3)}{AoF_T LMTD}$$

Donde:

- q Calor transferido.
- W Rata másica del fluido de agua a calentar se obtiene del rotámetro 1 (Q1).
- Cp Capacidad calorífica del agua a calentar evaluado en un valor promedio entre las temperaturas T1 y T3.
- T3 Temperatura a la entrada del agua a calentar del fluido de proceso
- T1 Temperatura de salida del fluido de proceso
- U Coeficiente total de transferencia de calor para el calentador.

LMTD Diferencia de temperatura promedio logarítmica para el calentador

$$LMTD = \frac{T1 - T3}{\ln \frac{Tv - T3}{Tv - T1}}$$

- Tv Temperatura de saturación del vapor de calentamiento, correspondiente a la presión del vapor leída con el manómetro P1
- F_T Factor de corrección para la media logarítmica de temperaturas. Este valor se calcula mediante parámetros que dependen de la temperatura (En textos de transferencia de calor se encuentran las gráficas, así mismo en el panel de control se encuentra una gráfica y la forma como se calculan los parámetros)
- Ao Área de transferencia de calor basada en el lado externo de los tubos

Sección De Enfriamiento

Para el intercambiador seleccionado de la sección de enfriamiento, una de las corrientes es el agua caliente proveniente del calentador que es enfriada mediante transferencia de calor con agua del acueducto. La ecuación de balance de calor que describe el proceso se puede expresar como:

$$q = wCpr(T4 - T3) = U' AoF_T LMTD'$$

$$U' = \frac{wC_{pr}(T_4 - T_3)}{A_o F_T LMTD'}$$

Donde:

- q Calor transferido
- w Rata másica del fluido refrigerante se obtiene del rotámetro 2 (Q2)
- C_{pr} Calor específico del fluido refrigerante. Valor promedio entre las temperaturas T3 y T4.
- T3 Temperatura de entrada del agua de refrigeración.
- T4 Temperatura de salida del agua de refrigeración
- U' Coeficiente total de transferencia de calor para el enfriador
- LMTD' Diferencia de temperatura promedia logarítmica para el enfriador

$$LMTD' = \frac{(T_1 - T_4) - (T_2 - T_3)}{\ln \frac{T_1 - T_4}{T_2 - T_3}}$$

A_o Área de transferencia de calor del intercambiador basada en el lado externo de los tubos

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El equipo está constituido por cinco intercambiadores de tubos y coraza (llamada también camisa), de un paso por la coraza y dos pasos por los tubos, colocados en posición horizontal ordenados uno encima de otro y con tuberías para su interconexión, un panel de control donde se encuentran medidores de caudal, temperatura y presión.

En la tabla 1 se presentan los datos de diseño de cada uno de los intercambiadores. El intercambiador 1 ubicado en la parte superior es un calentador que opera con vapor como fluido de servicio y agua fría como fluido de proceso. Los intercambiadores 2-5 son enfriadores que operan con agua caliente como fluido de proceso y agua fría como fluido de servicio. En la tabla se encuentra el diámetro interno (ID) y el espesor de la coraza, así mismo el número de bafles y su espaciado, el número, longitud, diámetro interno (ID) y el diámetro externo (OD) de los tubos de cobre dentro de cada uno de los intercambiadores.

Tabla 1. Datos de diseño de los intercambiadores de calor

DATOS DE DISEÑO										
I. INTER.	Camisa			Baffles		Tubos (Cobre)				
	ID	Espesor	Nº	Espaciamiento	Nº	Pasos	Longitud	OD	ID	
Calentador Vapor - Agua	1	10.16	0.211	0	0	21	2	91.44	0.952	0.8001
Enfriadores Agua - Agua	2	10.16	0.211	11	6.99	24	2	91.44	0.952	0.8001
	3	10.16	0.211	15	6.60	24	2	91.44	0.952	0.8001
	4	10.16	0.211	21	3.48	24	2	91.44	0.952	0.8001
	5	10.16	0.211	31	2.54	24	2	91.44	0.952	0.8001

NOTA: Todas las medidas de longitud se encuentra en cm.

En el panel de control se encuentran dos rotámetros para la medición de caudal y cuatro termostatos para medición de temperatura, dos medidores de presión para la caída de presión en la coraza de los intercambiadores. En la figura 1 se presenta un diagrama de la posición de los medidores, mientras que en la tabla 2 se presenta la nomenclatura de las variables a medir mostradas en el diagrama.

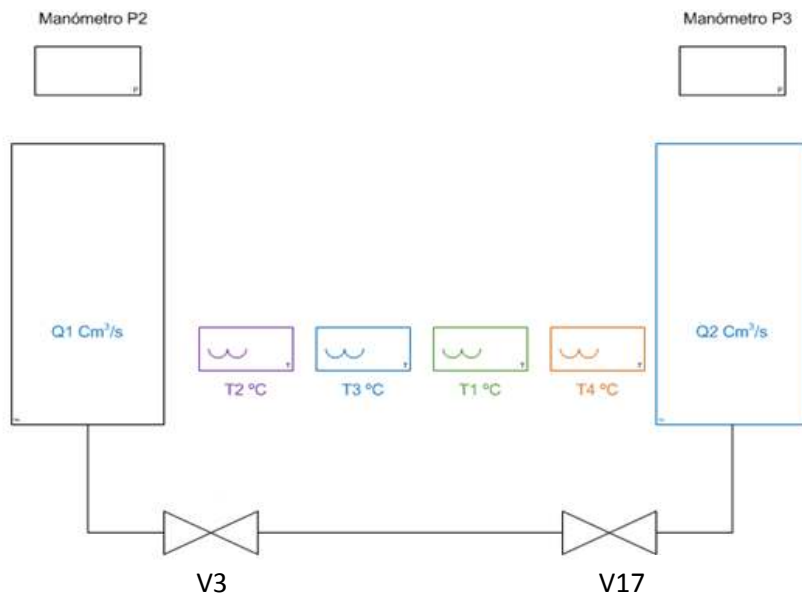


Figura 1. Panel de control del equipo

Tabla 2. Nomenclatura Variables A Medir

Variable	Descripción
Q1	Caudal de entrada del fluido de proceso al calentador
Q2	Caudal de entrada del fluido de servicio al enfriador
Q3	Caudal medido (Balde-Reloj) de salida de condensado del calentador
T1	Temperatura de salida del fluido de proceso del calentador
T2	Temperatura de salida del fluido de proceso del enfriador
T3	Temperatura de entrada del fluido de proceso al calentador y Temperatura de entrada del fluido de servicio al enfriador
T4	Temperatura de salida del fluido de servicio del enfriador
P1	Presión manométrica del vapor de entrada al calentador
P2 & P3	Presiones manométricas en la entrada y en la salida de la coraza de los enfriadores

NOTA: Los P1 y las válvulas para medir Q3 se muestran en el diagrama del equipo (Figura.2), ya que estos se encuentran por fuera del panel de control.

MANUAL DE FUNCIONAMIENTO

En la figura 2 se muestra un diagrama del equipo, con las válvulas y los medidores. Hay que tener en cuenta que el equipo va a operar con el intercambiador 1 (calentador) y con uno de los enfriadores. Es por esto que es indispensable la identificación de las corrientes y el manejo de las válvulas.

Para el calentador, el fluido de servicio (vapor) va por la coraza y el suministro se garantiza con una válvula al lado del manómetro P1, y el fluido de proceso (agua del suministro) va por los tubos y su caudal se regula por medio de la válvula V3 midiendo en el rotámetro Q1. Este caudal es el mismo para el fluido de proceso de los enfriadores (agua calentada en el intercambiador 1). Para el fluido de servicio (agua del suministro) de los enfriadores se regula con la válvula V17 midiendo en el rotámetro Q2

Se recomienda para la práctica verificar que todas las válvulas se encuentren cerradas y luego abrir en orden las que son necesarias lo más rápido posible para que en el sistema no haya sobrepresión, con el fin de evitar malas tomas de datos o un daño en el equipo.

1. Abrir parcialmente la válvula V1, la válvula de alimentación de agua al equipo.
2. Abrir la válvula V18 ubicada cerca de la trampa de vapor en la parte de abajo del equipo.

3. De acuerdo a la configuración seleccionada abrir las válvulas del intercambiador, por ejemplo para la configuración 1-2, abrir las válvulas V9, V5 y V13.
4. Se abren parcialmente las válvulas al lado de los rotámetros V3 y V17, y luego abrir completamente la válvula V1.
5. Ajustar los caudales con las válvulas V3 y V17, hasta que el sistema se estabilice en algún valor y no se presenten fugas en los intercambiadores.
6. Para purgar el sistema, sólo al inicio de la práctica y con la válvula V2 parcialmente abierta, abrir la válvula V4 y cerrar las válvulas V19 y V18. De esta forma se deja salir todo el condensado que se encuentre en las tuberías. Posteriormente cerrar la válvula V4 y abrir la válvula V18. Esta configuración debe permanecer así durante toda la práctica.
7. Después de la purga, abrir parcialmente la válvula V2 (alimentación del vapor) y ajustarla de tal forma que la presión mostrada en el manómetro P1 no sobrepase 10 psi.
8. Esperar a que el sistema se estabilice y tomar los datos necesarios para la práctica. Para medir el caudal Q3 abrir la válvula V19 y cerrar las válvulas V18. Luego de medirlo, volver a abrir la válvula V18 y cerrar la V19.
9. Para la configuración 1-3 abrir las válvulas V6, V10 y V14, y después cerrar las válvulas abiertas en el numeral 3, esperar hasta que se estabilice el sistema y tomar los datos de acuerdo al numeral 8.
10. Para la configuración 1-4 abrir las válvulas V7, V11 y V15 y después cerrar las válvulas abiertas en el numeral 9, esperar hasta que se estabilice el sistema y tomar los datos de acuerdo al numeral 8.
11. Para la configuración 1-5 abrir las válvulas V8, V12 y V16 y después cerrar las válvulas abiertas en el numeral 10, esperar hasta que se estabilice el sistema y tomar los datos de acuerdo al numeral 8.
12. Después de tomar los datos para las cuatro configuraciones anteriores, escoger una de tales configuraciones, y proceder a cambiar el caudal Q1. Esperar hasta que el sistema se estabilice, tomar datos y luego cambiar el caudal Q2. Esperar hasta que el sistema se estabilice y tomar datos.
13. Al terminar de trabajar, cerrar la válvula V2 completamente, esperar algunos minutos hasta que el sistema se enfríe y luego cerrar completamente la válvula de suministro de agua hasta que salga todo el agua del sistema y luego cerrar todas las válvulas completamente de arriba hasta llegar a las válvulas cerca de la trampa.

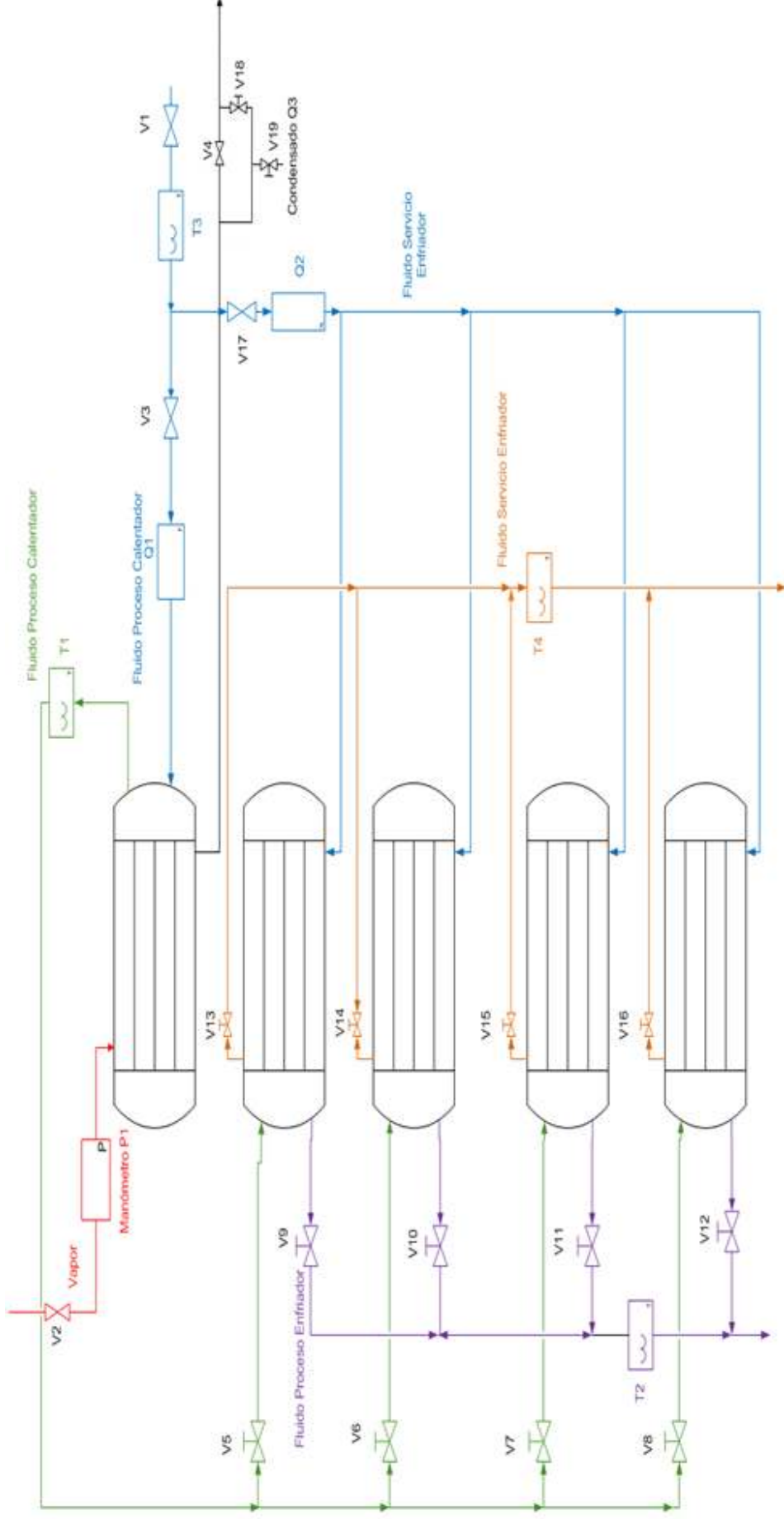


Figura 2. Diagrama del equipo

Seguridad

Hay que seguir el procedimiento descrito en el manual de funcionamiento con respecto al manejo de las válvulas, ya que se pueden crear sobrepresiones que causan fugas de agua en el equipo. Evitar el contacto con las paredes del intercambiador, en especial con el calentador, ya que en este se presentan temperaturas altas que pueden causar quemaduras en la piel. Para realizar la práctica de laboratorio se necesita bata, gafas, tapa oídos y guantes de seguridad.

Impacto ambiental

En el laboratorio se trabaja con aguas re circulantes, así que el impacto ambiental no es tan alto, a estas aguas se les realiza un mantenimiento.

DATOS OBTENIDOS

Para cada una de las configuraciones a usar (1-2,1-3,1-4,1-5), llenar la tabla siguiente:

Configuración 1-__ (Calentador 1 y enfriador i)

Q1 (cm ³ /s)		Condensado Recogido			
Q2 (cm ³ /s)		Toma	Vol(ml)	Tiempo(s)	Temp(°C)
T ₁ (°C)		1			
T ₂ (°C)		2			
T ₃ (°C)		3			
T ₄ (°C)		4			
P1 (PSI)		5			

Así mismo para la configuración seleccionada, en los cuales se varía Q1y Q2, llenar las tablas siguientes:

Configuración 1-__ Configuración escogida
 Calentador 1 y Enfriador # __

Q1 (cm ³ /s)		Condensado Recogido			
Q2 (cm ³ /s)		Toma	Vol(ml)	Tiempo(s)	Temp(°C)
T ₁ (°C)		1			
T ₂ (°C)		2			
T ₃ (°C)		3			
T ₄ (°C)		4			
P1 (PSI)		5			



Configuración 1-___ Configuración escogida

Calentador 1 y Enfriador # ___

Q1 (cm ³ /s)	
Q2 (cm ³ /s)	
T ₁ (°C)	
T ₂ (°C)	
T ₃ (°C)	
T ₄ (°C)	
P1 (PSI)	

Condensado Recogido			
Toma	Vol(ml)	Tiempo(s)	Temp(°C)
1			
2			
3			
4			
5			

CÁLCULOS

- Realizar los balances de calor para cada configuración y calcular las pérdidas para cada intercambiador para un caudal Q1.
- Calcular el coeficiente global de transferencia de calor para cada intercambiador.
- Comparar los resultados obtenidos para los cuatro enfriadores operando con los mismos flujos Q1 y Q2.
- Comparar los resultados obtenidos para un mismo intercambiador al variar los flujos de operación Q1 y Q2.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] GEANKOPLIS, C.J, “Procesos de transporte y operaciones unitarias”, 3° edición, Editorial Ceca, 1998, México.
- [2] Guía Laboratorio proporcionada por el docente.
- [3] INCROPERA, Frank P y DEWITT David, “Fundamentals of heat and mass transfer”, 4° edición, Editorial Wiley, 1996, EUA.