



LABORATORIO DE TRANSPORTE DE FLUIDOS Y TRANSMISIÓN DE CALOR

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA**

ÍNDICE DE PRÁCTICAS

PRÁCTICAS DE TRANSPORTE DE FLUIDOS

1.- Calibrado de un estrechamiento para la medida de caudales de líquidos	3
2.- Calibrado de un estrechamiento para la medida de caudales de gases	8
3.-Planta de Fluidos	13
4.-Estudio de bombas centrífugas	19
5.- Estudio de una bomba y sus componentes	25
6.- Bernouilli (efecto de ventura y diafragma). Bombas (curvas características y cavitación)	31

PRÁCTICAS DE TRANSMISIÓN DE CALOR

7.- Aislamiento térmico	38
8.- Estudio de un cambiador de calor (I): Doble tubo y placas planas	43
9.- Estudio de un cambiador de calor (II): Doble tubo, carcasa y tubos, placas planas	48

1. CALIBRADO DE UN ESTRECHAMIENTO PARA LA MEDIDA DE CAUDALES DE LÍQUIDOS

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

De las distintas formas posibles para medir el caudal de un fluido que circula por una tubería destacan los métodos dinámicos cuyo fundamento es la aplicación de los principios de conservación de materia y energía que se concretan en el teorema de Bernoulli. Estos métodos consisten en crear un estrechamiento de la corriente cuyo caudal se trata de determinar y, como según dicho teorema, todo aumento de la velocidad de flujo determina un aumento de la carga cinética, en ese punto ha de producirse una disminución de la carga estática o de presión, si se mantiene las otras magnitudes constantes.

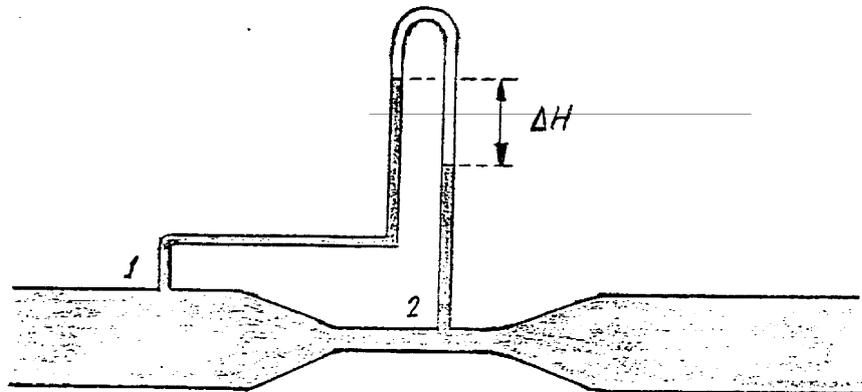


Figura 1.- Esquema de un estrechamiento

En relación al esquema del estrechamiento creado en una conducción cilíndrica y horizontal por la que circula un líquido, la aplicación del teorema de Bernoulli entre 1 (sección normal del tubo) y 2 (sección del estrechamiento) proporciona:

$$h_2 - h_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + \frac{p_1 - p_2}{\gamma} + h_f = h_w \quad [1]$$

donde:

h_1, h_2 = alturas geométricas de los puntos considerados

v_1, v_2 = velocidades del fluido en los puntos considerados

p_1, p_2 = presiones del fluido en los puntos considerados

γ = peso específico del fluido

h_f = pérdida de carga por fricción

h_w = trabajo dado al fluido o cedido por el fluido

Teniendo en cuenta que:

$h_1 = h_2$ (por ser la tubería horizontal)

$v = \text{Cte.}$ (por ser el fluido incompresible)

$h_f = 0$ (por estar los puntos 1 y 2 muy próximos y ser tubería lisa)

$h_w = 0$ (no hay bomba)

el teorema de Bernouilli se reduce a:

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} = \frac{\Delta p}{\gamma} \quad [2]$$

Como el caudal no varía a lo largo de la conducción ($v = Q/A$):

$$\frac{Q^2}{A_2^2} - \frac{Q^2}{A_1^2} = \frac{2g\Delta p}{\gamma} \quad [3]$$

(donde $A = \pi D^2/4$) siendo D el diámetro.

Sustituyendo:

$$Q = \sqrt{\frac{2g\Delta p/\gamma}{\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2}}} \quad [4]$$

Esta ecuación permite determinar el caudal circulante Q conocida la caída de presión Δp (debida al aumento de la velocidad provocada por el estrechamiento en 2), habiendo determinado previamente las secciones A_1 y A_2 .

Debido a las imperfecciones de ejecución de los dispositivos empleados para provocar la contracción, al frotamiento, a la turbulencia suplementaria que introduce la contracción y a la sobrecontracción de la vena fluida (vena contracta), la ecuación anterior no resulta rigurosamente cierta por lo que se introduce un coeficiente de corrección, que se denomina α , con lo que la ecuación queda de la forma:

$$Q = \alpha \sqrt{\frac{2g\Delta P/\gamma}{\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2}}} \quad [5]$$

Esta ecuación puede ponerse en función de los diámetros de la conducción y del estrechamiento, obteniéndose:

$$Q = \alpha A_2 \sqrt{\frac{2g\Delta H}{1 - \beta^4}} \quad [6]$$

en donde $\beta = D_2/D_1$.

Si se tiene en cuenta que $\Delta P/\gamma = \Delta H$ es la altura manométrica referida al propio líquido que circula por la conducción, que es leída en el manómetro conectado en 1 y 2:

A pesar de que en la instalación del laboratorio suele hacerse, por razones de facilitar la construcción del estrechamiento de forma que $A_1 = A_2$, el dispositivo es válido, ya que el fluido en 2 no logra la presión que tenía en 1 debido a que la vena del líquido a la salida del estrechamiento lo hace en forma de chorro cilíndrico, todavía sin expansionar, y debido a la existencia de una pérdida de carga no recuperable denominada carga permanente, lo que hace que el manómetro marque la diferencia H. Esto, y la difícil determinación del diámetro del estrechamiento, obliga necesariamente a la determinación experimental de la pérdida de carga provocada por cada estrechamiento, en particular como una función de las características geométricas del mismo y de las propiedades físicas del líquido circulante; es decir, es necesario hacer un calibrado para la obtención de la correspondiente ecuación empírica.

La ecuación anterior queda de la forma:

$$Q = k\sqrt{\Delta H} \quad [7]$$

es decir, una recta de pendiente $k = \alpha A_2 (2g/(1-\beta^4))^{1/2}$ que constituye una asociación de magnitudes que caracterizan a la geometría de la conducción y a la densidad del líquido.

Pueden ensayarse otras formas semi-empíricas o totalmente empíricas para correlacionar el caudal y la altura.

2. OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

Identificar cada una de las partes de la instalación experimental y comentar sus funciones. Confeccionar un esquema del equipo y asignar una referencia numérica a cada elemento.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Antes de abrir la llave general del agua asegurarse de que la llave de seguridad está completamente abierta. Abrir aquella de modo que el agua llene el depósito regulador rebosando la sobrante por la conducción de desagüe. Purgar el manómetro si fuera necesario. Controlar el caudal de agua para conseguir una determinada altura manométrica. Realizar medidas de volúmenes determinados de agua tomando las correspondientes medidas de tiempos y alturas manométricas.

4. TRATAMIENTO DE DATOS

- a) Conocidos los volúmenes de agua y los tiempos correspondientes, calcular el caudal de agua relativo a cada altura manométrica.
- b) Representar Q frente a $(\Delta H)^{1/2}$. Si se cumple la ecuación deducida debe resultar una recta. En ese caso ajustar dicha recta por mínimos cuadrados. Conclusiones.
- c) Emplear otra ecuación empírica de la forma $Q = k(\Delta H)^n$ para el ajuste de los datos experimentales. Determinar n .

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Explicar posibles causas de la desviación de n respecto a 0,5. Estimar *a posteriori* el valor de D_2 .
- Función del rebosadero.
- Explicar si puede actuar como líquido manométrico otro diferente al fluido circulante.
- Cómo explicarías el hecho que la dos tomas de presión estén ubicadas en la conducción principal (igual diámetro).

6. BIBLIOGRAFÍA

- Vián-Ocón. "Elementos de Ingeniería Química", Ed. Aguilar, 3ª edición, 1972.
- Ocón-Tojo. "Problemas de Ingeniería Química". Ed. Aguilar, 3ª edición, 1974.
- Costa Novella, "Ingeniería Química. Flujo de fluidos, vol. 3". Ed. Alhambra, 1ª edición, 1985.

2. CALIBRADO DE UN ESTRECHAMIENTO PARA LA MEDIDA DE CAUDALES DE GASES

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Se trata de desarrollar un método de medida de caudales en una conducción de gases. Para ello se va a hacer uso de un método dinámico consistente en provocar un estrechamiento en la conducción y aplicar los principios de conservación de masa y de energía mecánica con el fin de conseguir una ecuación que dé el comportamiento del fluido.

En relación al esquema representado en la figura adjunta la aplicación de la ecuación de Bernoulli en forma diferencial (a causa de la compresibilidad del fluido circulante) proporciona:

$$\frac{v dv}{\alpha} + g dz + v dp + d(\Sigma F) = 0 \quad (1)$$

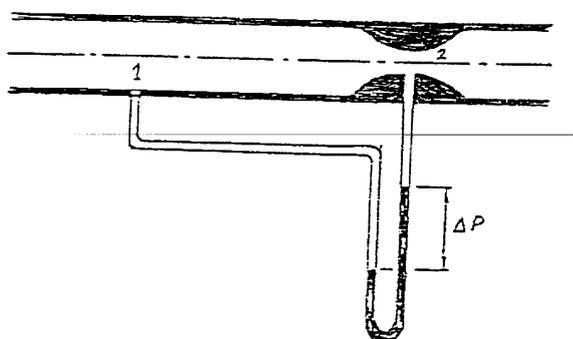
v = velocidad fluido

z = altura geométrica

v = volumen específico

p = presión del fluido

ΣF = pérdida por fricción



Considerando la conducción horizontal ($dz = 0$) y que las pérdidas por rozamiento son despreciables entre puntos próximos:

$$\frac{v dv}{\alpha} + v dp = 0 \quad (2)$$

que aplicada para una situación finita dada por los puntos 1 y 2:

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2\alpha} = \int v dp \quad (3)$$

Puede considerarse que entre 1 y 2 el flujo es adiabático:

$$p v^\gamma = cte \quad (4)$$

y teniendo en cuenta el principio de continuidad:

$$\rho_1 v_1 S_1 = \rho_2 v_2 S_2 \quad (5)$$

al integrar la expresión anterior se obtiene:

$$v_2 = A_2 \sqrt{\frac{2\alpha}{1 - (p_2/p_1)^{2/\gamma}} \frac{\gamma}{\gamma - 1} p_1 v_1 \left(1 - \frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad (6)$$

Esta ecuación al escribirse para el flujo másico queda:

$$m = A_2 \sqrt{\frac{2\alpha}{1 - N^{2/\gamma} \beta^4} \frac{\gamma}{\gamma - 1} p_1 v_1 N^{2/\gamma} (1 - N)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad (7)$$

que proporciona el flujo másico en función de:

A_2 = sección transversal del estrechamiento

p_1 y p_2 = presiones del fluido en los puntos 1 y 2

ρ_1 = densidad del fluido en 1 (inversa de v_1)

γ = coeficiente adiabático

N = relación de presiones ($N = p_2/p_1$)

β = relación de diámetros ($\beta = D_2/D_1$)

α = parámetro de corrección de la velocidad ($\alpha = 1$ turbulento)

Esta ecuación puede simplificarse en función de una comparación con la correspondiente a los fluidos incompresibles:

$$m = A_2 Y \sqrt{2 \alpha \rho_1 \frac{\Delta p}{1 - \beta^4}} \quad (8)$$

donde Y es un factor de compresibilidad que vale:

$$Y = \sqrt{\frac{1 - \beta^4}{1 - N^{2/\gamma} \beta^4} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{N^{2/\gamma}}{1 - N} (1 - N)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad (9)$$

Al tratar la ecuación de Bernoulli ya se habían despreciado las pérdidas energéticas por fricción y la variación de calor, por lo que esta ecuación no describirá rigurosamente el sistema. Adicionalmente, la imperfección mecánica del estrechamiento no permite conocer con exactitud su geometría. Por ello es necesario introducir un factor de corrección C :

$$m = C A_2 Y \sqrt{2 \alpha \rho_1 \frac{\Delta p}{1 - \beta^4}} \quad (10)$$

Por analogías, análisis dimensional y experimentación pueden obtenerse expresiones para el cálculo de los factores C e Y para el caso de estrechamientos estandarizados (placas, boquillas, etc).

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En esta práctica se utilizará un estrechamiento cilíndrico para el que no se dispone de su diámetro ni se conoce la presión P_2 del fluido. Por otra parte, por razones de mayor facilidad de construcción del dispositivo experimental a emplear, la toma de presión 2 no se hace sobre el estrechamiento sino más adelante, lo que es igualmente válido dado que se detecta el chorro de gas cinéticamente efectivo. Ello hace que sea necesario el calibrado del medidor de caudal.

Puede tomarse como punto de partida una simplificación de la ecuación anterior, como:

$$m = C' \sqrt{p_1 \Delta p} \quad \text{o bien:} \quad Q = C' \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_1}} \quad (11)$$

$$C' = C Y A_2 \sqrt{\frac{2\alpha}{1-\beta^4}} \quad (12)$$

donde Δp , caída de presión del fluido circulante, es:

$$\Delta p = (\Delta H)\gamma = \Delta H'(\gamma' - \gamma) = \Delta H'\gamma' = \Delta H'\rho' g \quad (13)$$

siendo ΔH la pérdida de carga medida en altura del gas circulante de peso específico γ , $\Delta H'$ la pérdida de carga medida en altura del líquido manométrico de peso específico γ' y densidad ρ' .

Así:

$$Q = c' \sqrt{\frac{\Delta H' g \rho}{\rho_1}} = K' \sqrt{\frac{\Delta H'}{\rho_1}} \quad (14)$$

Si el fluido cumple la ley de los gases ideales, $\rho = p_1 M / RT$:

$$Q \sqrt{\frac{pM}{RT}} = K' \sqrt{\Delta H'} \quad (15)$$

$$Q \sqrt{p_1 \frac{M}{T}} = K \sqrt{\Delta H'} \quad (16)$$

en donde K es una constante para cada estrechamiento en particular, p_1 es la presión antes del estrechamiento ($= \Delta p + P_{atm}$), M la masa molecular del gas y T la temperatura.

Identificar el equipo experimental y realizar un esquema del mismo indicando cada uno de sus elementos básicos. Antes de conectar la bomba abrir totalmente la llave de seguridad.

Puesta en marcha la bomba controlar el caudal deseado mediante la llave adecuada y tomar medidas del caudal por medio del medidor de burbuja; medir tiempos y alturas manométricas. Tomar valores de las condiciones ambientales.

3. TRATAMIENTO DE DATOS

- 1) Representar y ajustar los datos experimentales a la ecuación obtenida anteriormente.
- 2) Comprobar la calidad del ajuste. Interpretaciones.
- 3) Ajustar de nuevo los datos a una ecuación totalmente empírica del tipo $Q\sqrt{p_1 M/T} = K_2(\Delta H)^b$.
- 4) Interpretaciones.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Explicar causas de la desviación de b respecto a 0,5. ¿Qué implicaciones hay si se utiliza otro líquido manométrico? Peculiaridades de la medida del caudal de gases.
- Requisitos básicos que debe poseer el líquido utilizado en un manómetro diferencial de un medidor de caudal de gases, como el utilizado en la práctica.
- La constante "K" que se ha determinado experimentalmente en la ecuación empírica de ajuste Q-H, ¿de qué variables depende?

5. BIBLIOGRAFÍA

- Vián-Ocón. "Elementos de Ingeniería Química", Ed. Aguilar, 3ª edición, 1972.
- Ocón-Tojo. "Problemas de Ingeniería Química". Ed. Aguilar, 3ª edición, 1974
- Costa Novella, "Ingeniería Química. Vol 3. Flujo de fluidos", Ed. Alhambra, 1º edición, 1985

3. PLANTA DE FLUIDOS

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Esta práctica trata de familiarizar al alumno con ciertos fenómenos que ocurren cuando un fluido circula en régimen turbulento por el interior de una conducción cilíndrica. Se adquieren así, conocimientos que tienen por objeto lograr el diseño óptimo de una instalación para el transporte de fluidos.

Puede considerarse que, dentro de la amplia versatilidad que presenta la instalación experimental, dos son los aspectos que tratan de analizarse:

- 1) *Estudio de los fenómenos relacionados con la presencia de un estrechamiento brusco insertado en una conducción.* Se trata de aplicar conceptos básicos como son el principio de continuidad y los balances de energía y de cantidad de movimiento, y las desviaciones de la idealidad por la existencia de remolinos y torbellinos que dan lugar a la introducción de un coeficiente de descarga, lo que se manifiesta en una caída de la presión del fluido, bien temporal o bien permanentemente.

También es posible analizar en qué medida afectan al flujo diversos dispositivos o accidentes implicados en la instalación. En este sentido, el equipo experimental ofrece la existencia de una "U" curva y otra "U" cuadrada. Puede estimarse la longitud equivalente de las mismas y comparar los resultados con los estimados a través de la bibliografía.

- 2) *Estudio de los fenómenos de rozamiento como consecuencia de la viscosidad de los fluidos reales.* Para ello se realizan medidas de la pérdida de carga variando, por una parte, el caudal del líquido circulante y, por otra, el diámetro de la conducción. Los resultados obtenidos pueden compararse con la curva correspondiente del diagrama de Moody para tubos lisos ($\epsilon/D=0$).

A) Para un estrechamiento: teniendo en cuenta la ecuación de continuidad, el balance de energía mecánica (Bernouilli) y aplicando todas las simplificaciones concernientes al caso, se obtiene:

$$Q = CA_0 \sqrt{\frac{2g \left(\frac{\Delta p}{g\rho} \right)}{(1 - \beta^4)}} \quad (1)$$

en donde:

Q caudal volumétrico

A₀ sección del estrechamiento

- ρ densidad del fluido circulante
- β relación de diámetros (<1)
- Δp caída de presión en el estrechamiento
- C coeficiente de descarga

El coeficiente de descarga se introduce para tener en cuenta el comportamiento no ideal del sistema. Tiene que calcularse para cada sistema (geometría del estrechamiento, tipo de fluido).

Como consecuencia de la no idealidad del proceso, parte de la energía del fluido se disipa de forma irreversible, traduciéndose en una caída de presión permanente.

B) Para el coeficiente de fricción: Debido a la viscosidad de los fluidos reales, cuando tiene lugar el flujo por una conducción se produce un perfil de velocidades, con velocidades decrecientes desde el centro hacia las paredes de la conducción. Debido a ello, es necesaria la existencia de una fuerza para mantener el fluido en movimiento y compensar las fuerzas de rozamiento generadas.

En principio, este fenómeno vendría cuantificado, en flujo turbulento, por un coeficiente de transferencia de cantidad de movimiento:

$$\tau_{rz}|_{r=0} = \varepsilon_\tau (\rho_m v_m - \rho_0 v_0) = \varepsilon_\tau \rho_m \quad (2)$$

Sin embargo, se emplea el coeficiente f' , definido por Fanning y Darcy, como factor de proporcionalidad con la energía cinética. Así, propusieron:

$$h_f = f' \frac{L v^2}{D 2g} \quad (3)$$

siendo:

$$f = 4f'$$

L longitud de la tubería en la que se considera el rozamiento

D diámetro de la tubería

v velocidad del fluido circulante

g aceleración de la gravedad

h_f pérdida de carga por fricción (unidades de longitud)

En esta práctica se procede a medir la caída de presión Δp que existe entre dos puntos de la conducción. Al aplicar, bien la ecuación de Bernoulli, o bien ya directamente, que las fuerzas de presión igualan a las de rozamiento, por ser las únicas existentes, se llega a :

$$\frac{\Delta p}{\rho g} = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

Por otra parte, mediante análisis dimensional se llega a:

$$\frac{\Delta p}{\rho v^2} = \Phi(\varepsilon / D, vD\rho / \mu) \quad (5)$$

o, de otro modo:

$$\Delta p = \frac{L}{D} \rho v^2 \Phi(\varepsilon / D, vD\rho / \mu) \quad (6)$$

y si se comparan, se obtiene:

$$f = \Phi(\varepsilon / D, Re) \quad (7)$$

y en ello es en lo que se basa el diagrama de Moody.

3. MATERIAL NECESARIO

La instalación experimental consta básicamente de los siguientes elementos:

- Entrada del fluido (agua) al sistema
- Rotámetro y llave reguladora para la medida del caudal
- Conjunto de llaves para selección de conducciones
- Conducción (1) con venturímetro y sistema de manómetros
- Conducción (2) con "U" redonda u cuadrada
- Conducciones (3,4,5) de diferente diámetro e igual longitud
- Identificar cada uno de estos elementos. Hacer un esquema de la instalación.
- Calibrar el rotámetro

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Con el agua circulando tomar los valores de la caída de presión en cada elemento de cada conducción correspondientes a cada caudal.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Para el venturímetro, determinar el coeficiente de descarga; determinar y representar la caída de carga temporal y permanente frente al Re.
- Calcular los valores del coeficiente de fricción para cada conducción y cada caudal empleados y representarlos conjuntamente con la curva teórica proporcionada por la bibliografía.
- A partir de la pérdida de carga para las "U" curva y cuadrada, y con el coeficiente f experimental, determinar la longitud equivalente y compararla con la proporcionada por los ábacos correspondientes.
- ¿De qué depende el coeficiente de fricción, f ?
- Comentar los valores encontrados para las pérdidas de carga temporal y permanente, para los factores de fricción, longitudes equivalentes de las "U", etc.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Vián-Ocón. "Elementos de Ingeniería Química", Ed. Aguilar, 3ª ed., 1972
- Ocón-Tojo. "Problemas de Ingeniería Química", Ed. Aguilar, 3ª ed., 1974

NOTA:

Datos de la instalación:

TUBO 1:	$D_{e \text{ tubería}} = 4,73 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	$D_{i \text{ tubería}} = 4,33 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	
	$D_{e \text{ estrechamiento}} = 2,63 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	$D_{i \text{ estrechamiento}} = 2,23 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	
	ΔP_1 : caída de presión permanente $L_1 = 1,89 \text{ m}$		
	ΔP_2 : caída de presión semipermanente $L_2 = 67,4 \cdot 10^{-2} \text{ m}$		
	ΔP_3 : caída de presión temporal $L_3 = 8,3 \cdot 10^{-2} \text{ m}$		
TUBO 2:	U redonda: $L = 33,2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	U cuadrada: $L = 37,1 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	
	$D_{e \text{ tubería}} = 1,89 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	$D_{i \text{ tubería}} = 1,49 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	
TUBO 3:	$L = 2,44 \text{ m}$	$D_{e \text{ tubería}} = 1,84 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	$D_{i \text{ tubería}} = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ m}$
TUBO 4:	$L = 2,45 \text{ m}$	$D_{e \text{ tubería}} = 3,3 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	$D_{i \text{ tubería}} = 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ m}$
TUBO 5:	$L = 2,44 \text{ m}$	$D_{e \text{ tubería}} = 4,68 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	$D_{i \text{ tubería}} = 4,18 \cdot 10^{-2} \text{ m}$

4. ESTUDIO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La utilización adecuada de una bomba centrífuga requiere conocer la dependencia de determinadas magnitudes con el caudal. Dichas variaciones se presentan gráficamente por medio de las denominadas curvas características frente al caudal (Q): Carga total (H), Potencia al freno, (P_w). Rendimiento total (η_t) y Carga neta positiva de aspiración disponible (CNPA)_D.

En la figura 1 se esquematiza una instalación en la cual una bomba realiza un trabajo para transportar un fluido desde un punto 1 a otro punto 2 a distinto nivel. La conducción que antecede a la bomba se denomina de aspiración y la que le sigue, se descarga.

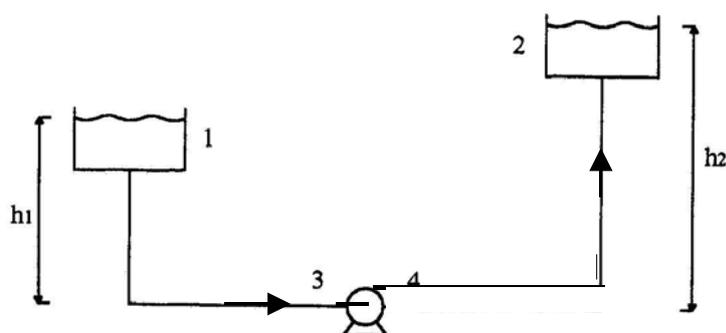


Figura 1.- Esquema de una instalación

Los conceptos relativos a esta práctica se basan en la ecuación de Bernoulli:

$$W = \left(\frac{v_2^2}{2\alpha_2} - \frac{v_1^2}{2\alpha_1} \right) + g(z_2 - z_1) + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \sum F \quad [1]$$

donde v , P , α y ρ son la velocidad eficaz y densidad del líquido, g la gravedad, z la altura geométrica, W la energía comunicada y $\sum F$ las pérdidas por fricción.

1.1. Curva carga-caudal

La carga total de una bomba es la altura (metros de líquido) a la que se podría elevar el líquido si emplease en ello toda la energía comunicada. Un balance de energía entre los puntos 1 y 2 (con h_{fd} y h_{fa} las cargas de fricción en las conducciones de descarga y de aspiración) proporciona:

$$H = (z_2 - z_1) + \frac{P_1 - P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + h_{fd} + h_{fa} \quad [2]$$

1.2. Curva potencia al freno-caudal

La potencia al freno, o potencia consumida, (P_w) es la que el motor eléctrico comunica al eje que mueve el rotor de la bomba. Se calcula mediante:

$$P_w = I_e V_e \cos \varphi \quad [3]$$

donde I_e y V_e son los valores de la intensidad y el voltaje eficaces, respectivamente, que se obtienen en el amperímetro y voltímetro y $\cos \varphi$ es el factor de potencia.

1.3. Curva rendimiento-caudal.

Las bombas centrífugas constan del motor eléctrico y la bomba propiamente dicha. Estos elementos experimentan pérdidas de energía. Los rendimientos se engloban en el rendimiento total, relación entre la potencia comunicada al fluido (P_h) y la consumida por el motor.

$$\eta_t = \frac{P_h}{P_w} = \frac{Q \rho g h_w}{I_e V_e \cos \varphi} \quad [4]$$

1.4. Curva carga neta positiva de aspiración disponible-caudal.

La carga neta positiva de aspiración del sistema se determina en la boca de la bomba:

$$(CNPA)_D = h_a - \frac{P_v}{\rho g} \quad [5]$$

donde P_v es la presión de vapor del líquido y h_a es la carga de aspiración. Esta variable se puede determinar mediante un balance entre los puntos 1 y 3 (Figura 1):

$$h_a = (z_1 - z_3) + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} - h_{fa} \quad [6]$$

Sustituyendo la ec. [6] en la [5] queda la siguiente expresión:

$$(CNPA)_D = (z_1 - z_3) + \frac{P_1 - P_v}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} - h_{fa} \quad [7]$$

Esta magnitud indica el valor para el que la presión absoluta en el punto de aspiración sobrepasa a la presión de vapor del líquido. Para este punto hay que distinguir entre el CNPA requerido, característica de la bomba, y el CNPA disponible, propiedad de la instalación.

3. MATERIAL NECESARIO

El equipo consta de dos bombas centrífugas similares que se pueden asociar en serie o en paralelo mediante una válvula de tres vías (V_3) (hacer el diagrama de flujo), y que hacen circular agua en circuito cerrado. Ambas bombas poseen válvulas en los puntos de aspiración y de descarga (V_2 y V_1 para la bomba 1 y V_6 y V_5 para la bomba 2). En las conducciones de aspiración se hallan válvulas de no retorno para evitar que se desceben. En la conducción de aspiración de la bomba 1 se encuentra un vacuómetro para registrar depresiones. A la salida de la bomba 1 se halla un rotámetro para determinar el caudal. En la conducción de descarga se halla un manómetro donde se determina la presión y, a continuación, una válvula de impulsión general (V_4). La instalación está dotada con una válvula auxiliar (V_x) para utilizar la instalación con otros fines. Se completa con un panel donde hay un interruptor general, otros dos para cada una de las bombas, un amperímetro y un voltímetro.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

a) Bombas individuales. Para la bomba 1, se abren totalmente las válvulas V_1 , V_2 y V_4 . Se conecta el interruptor general y el de la bomba. Se esperan unos minutos y se va cerrando la válvula V_4 hasta alcanzar el caudal deseado; se espera de nuevo unos minutos para que se estabilice el flujo. Se registran los valores del rotámetro, vacuómetro, manómetro y amperímetro. Para la bomba 2, el procedimiento es análogo, exceptuando la toma de datos del vacuómetro.

b) Bombas asociadas. i) Con la asociación de bombas en paralelo debe obtenerse el doble de caudal, manteniéndose la presión constante. Debido a la limitación del rotámetro, es necesario reducir el caudal de las bombas a la mitad. Se procede del modo siguiente: Abrir las válvulas V_1 , V_2 y V_4 . Conectar la bomba 1 y regular el caudal con la válvula V_1 . Apagar la bomba. Cerrar la válvula V_2 y abrir las V_5 y V_6 . Accionar la válvula V_3 para conexión en paralelo. Regular el caudal de la bomba 2. Conectar la bomba 1 y proceder a la toma de datos (se debe realizar la toma de datos para las bombas en funcionamiento individual y asociadas).

ii) La asociación de bombas en serie permite duplicar la presión manteniendo el mismo caudal que ofrecería una sola bomba. En este caso se debe regular el caudal de ambas bombas de forma análoga que en el caso anterior, y se acciona la válvula V_3 para operar en serie.

5. TRATAMIENTO DE DATOS

Obtener tablas de la forma:

Q (L/h)	p _{vac} (cm Hg)	p _{man} (bar)	I (A)
---------	--------------------------	------------------------	-------

donde P_{vac} y P_{man} son las presiones en el vacuómetro y el manómetro, respectivamente.

La carga total se obtiene mediante la ec. [2], aplicada entre el nivel del líquido en el depósito y el manómetro. Pueden despreciarse los términos cinético y de fricción:

$$H = (z_2 - z_1) + \frac{P_{\text{man}}}{\rho g} \quad [8]$$

La potencia al freno se calcula por la ec. [3] (factor de potencia igual a 0,65).

La carga neta positiva de aspiración disponible (ec. [9]), tomando como punto 1, el punto donde se halla el vacuómetro. Despreciando los términos cinético y de fricción:

$$(CNPAD)_D = (z_1 - z_3) + \frac{P_{\text{atm}} - P_{\text{vac}} - P_v}{\rho g} \quad [9]$$

Para el funcionamiento individual y en asociación, obtener respectivamente tablas de las formas indicadas y las curvas características correspondientes:

Q (m ³ /s)	H (m)	P _w (W)	η (%)	CNPAD (m)
-----------------------	-------	--------------------	-------	-----------

Q (m ³ /s)	H (m)	P _w (W)	η (%)	H teor.(m)
-----------------------	-------	--------------------	-------	------------

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Comentar los resultados obtenidos para las diferentes curvas. Comparar los resultados obtenidos para las 2 bombas. Justificar si es correcto o no despreciar el término cinético.
- Comparar los resultados obtenidos en las asociaciones de bombas con las curvas teóricas.
- ¿Cuáles son las condiciones de operación para experimentales para determinar la carga máxima de la bomba?
- ¿Qué hay que hacer para evitar que una bomba centrífuga se descebe?
- ¿Cuál es el máximo vacío que se puede dar en el punto de aspiración de la bomba?

7. BIBLIOGRAFÍA

- Costa Novella, E. "Ingeniería química. Flujo de fluidos" Vol. 3, Ed. Alhambra, 1985.
- Levenspiel, O. "Flujo de fluidos e intercambio de calor" Ed. Reverté, 1993.

5. ESTUDIO DE UNA BOMBA Y SUS COMPONENTES

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Las bombas se emplean para impulsar líquidos cuando el fluido no posee suficiente energía para vencer las diferencias de altura, velocidad o presión.

En las bombas centrífugas, objeto del estudio, el líquido circula libremente a través de ellas, recibiendo la energía necesaria por acción de una fuerza centrífuga que le comunica un rodete a gran velocidad.

A continuación se muestra el esquema de una instalación con una bomba para la impulsión de un líquido desde un punto 1 hasta el punto 2 a mayor altura. Los puntos 3 y 4 representan, respectivamente, la aspiración y la descarga.

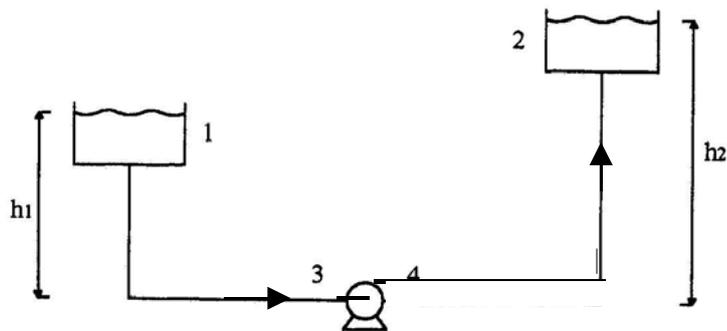


Figura 1.- Esquema de una instalación de bombeo

El balance de energía o ecuación de Bernoulli se puede expresar en términos de cargas, de forma que cada uno de los términos de la ecuación se expresa en unidades de longitud.

$$(h_2 - h_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2\alpha g} + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{\Sigma F}{g} = \frac{W}{g} = h_w \quad (1)$$

donde ρ representa la densidad, v la velocidad, p la presión del fluido, h la altura geométrica, α el factor de velocidad eficaz, W la energía comunicada y ΣF las pérdidas de energía por fricción y por unidad de masa.

La carga de aspiración por unidad de masa de la bomba (H_a) se puede obtener con un balance de energía mecánica entre los puntos 1 y 3:

$$H_a = \frac{1}{g} \left(\frac{p_3}{\rho} + \frac{v_3^2}{2\alpha} \right) \quad (2)$$

Análogamente, se puede obtener la carga de impulsión:

$$H_i = \frac{1}{g} \left(\frac{p_4}{\rho} + \frac{v_4^2}{2\alpha} \right) \quad (3)$$

La carga total de la bomba será, por tanto:

$$H = H_i - H_a = (h_2 - h_1) + \frac{1}{g} \left(\frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2\alpha} + \Sigma F \right) \quad (4)$$

La $CNPA_{requerido}$ es la energía mínima que debe tener el líquido a la entrada del rodete para que no se produzca cavitación. Este es un parámetro característico de la bomba. También se puede hablar de $CNPA_{disponible}$, parámetro que depende de la instalación en la que esté colocada la bomba.

$$CNPA_{disponible} = H_a - \frac{P_v}{\rho g} \quad (5)$$

El rendimiento total de la bomba es la relación entre la potencia comunicada al fluido (P_h) y la consumida por el motor (P_w)

$$\eta = \frac{P_h}{P_w} = \frac{Qg\rho H}{P_w} \quad (6)$$

2. OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

El objetivo de esta práctica es el estudio de los componentes de las bombas centrífugas así como la obtención de las curvas características de la bomba en función del caudal, del tamaño del rodete y de la velocidad de giro.

3. MATERIAL NECESARIO

El equipo consta de una bomba centrífuga que impulsa agua procedente de un depósito en circuito cerrado. En la conducción de impulsión se dispone de un manómetro para determinar la presión de descarga (m.c.a); las depresiones debidas a la aspiración de la bomba se pueden leer en un vacuómetro (la medida se da en cm de Hg) en este tramo se sitúa una válvula de bola para evitar que se descebe la bomba.

La regulación del caudal se realiza a través de una válvula de compuerta situada en la conducción de descarga.

La instalación dispone también de un cuadro eléctrico en el que se incluye el regulador de sentido de giro, el interruptor general, el controlador de frecuencia, el potenciómetro y el dispositivo de lectura del caudal.

También es posible sustituir los rodets de la bomba, y modificar la velocidad de giro, de manera que la instalación permite estudiar la influencia de estos factores en el rendimiento de la bomba.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

a) Comprobación del sentido de giro

Se conecta el interruptor general del cuadro, se acciona el selector de la bomba y se analiza si el sentido es el adecuado (no es conveniente que la bomba funcione durante mucho tiempo en sentido inverso, ya que se puede romper el sello mecánico).

b) Curvas características de la bomba

Una vez seleccionado el sentido de giro adecuado, se realizarán las distintas mediciones, es decir, se seleccionarán distintos caudales mediante la válvula de compuerta (es necesario esperar unos minutos para que se establezca el flujo) registrando los valores del manómetro, vacuómetro y potenciómetro.

Se repetirán estos pasos con distintas velocidades de giro, para un rodete dado, y con distintos rodets.

c) Cálculo del CNPA requerido por la bomba

Para obtener el valor de la carga neta positiva de aspiración requerida por la bomba se debe provocar la cavitación igualando así el $CNPA_{requerido}$ y el $CNPA_{disponible}$.

Se pone en marcha la bomba y se establece un régimen de funcionamiento con la válvula de regulación de caudal un poco estrangulada. Se anota la altura manométrica proporcionada por la bomba. A continuación se estrangula poco a poco la válvula de la tubería de aspiración abriendo simultáneamente la válvula de regulación de caudal para mantener el caudal constante hasta que la altura manométrica generada por la bomba es un 3% inferior a la proporcionada anteriormente (se define por convenio que se empieza a producir la cavitación en este momento).

d) Cambio de rodete

Se desconecta el interruptor general del cuadro desenchufando a continuación el enchufe trifásico que va del cuadro a la bomba.

Posteriormente se vacía el agua de la parte superior de la instalación. Para ello se conecta uno de los enchufes rápidos en una de las tomas de presión, se desconecta el tubo que lleva acoplado y se observa cómo entra aire en la instalación quedándose el agua a la altura del depósito.

Se cierra la válvula de bola de la aspiración y se abre la válvula de vaciado de la bomba que está situada en la parte inferior. Mediante una llave hexagonal se aflojan los tornillos y se retira el conjunto motor-rodete. A continuación se extrae el rodete después de haber aflojado la tuerca (hay que tener cuidado ya que queda al descubierto el sello mecánico y en ocasiones sale de su apoyo).

Para montar de nuevo el rodete se procede en sentido inverso, teniendo en cuenta que tanto el eje como el agujero del rodete han de estar limpios.

5. TRATAMIENTO DE DATOS

Obtener tablas de la forma siguiente para las distintas velocidades de giro y con los diferentes rodets:

Q (L/min)	p _{vac} (cm Hg)	p _{man} (m.c.a)	P (W)
-----------	--------------------------	--------------------------	-------

La carga total se puede obtener a partir de la ecuación (4) despreciando el término cinético:

$$H = (h_2 - h_1) + \frac{p_{man}}{\rho g} + \frac{\Sigma F}{g} \quad (7)$$

La CNPA_{disponible} se calcula a partir de la ecuación (5) despreciando el término cinético.

$$CNPA_{disponible} = (h_1 - h_3) + \frac{p_{atm} - p_{vac} - p_v}{\rho g} \quad (8)$$

Se deberán obtener tablas de la siguiente forma para las distintas velocidades de giro y rodets:

Q (L/min)	H (m)	η (%)	CNPA _{disponible} (m)
-----------	-------	-------	--------------------------------

Datos necesarios:

D_{interior} de la tubería de aspiración: 27,2 mm

D_{interior} de la tubería de impulsión: 34 mm

Diámetros de los rodets suministrados: 130,120 y 110 mm

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Analizar las distintas curvas características obtenidas (comparación entre distintos rodets y distintas frecuencias de giro).
- Comprobar si se cumplen las leyes de semejanza entre los resultados obtenidos con diferentes velocidades de giro y con los distintos rodets.
- Estudiar el rango de operación de la bomba en función del $CNPA_{requerido}$.
- ¿De qué material es el rodete de la bomba? ¿Qué características debe cumplir?
- ¿Cuáles son las condiciones de operación para experimentales para determinar la carga máxima de la bomba?
- ¿Qué hay que hacer para evitar que una bomba centrífuga se descebe?
- ¿Cuál es el máximo vacío que se puede dar en el punto de aspiración de la bomba?
- ¿Cómo afecta el tamaño del rodete al caudal circulando y a la potencia consumida?
- ¿En que condiciones de operación existen más posibilidades de cavitación?
- Añadir las observaciones personales sobre la práctica.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Levenspiel, O.; “Flujo de fluidos e intercambio de calor”; Ed. Reverté; Barcelona, 1993
- Costa Novella, E.; “Ingeniería química. Flujo de fluidos”; Vol. 3; Ed. Alhambra; Madrid, 1985

**6. BERNOUILLI (EFECTO DE VENTURA Y DIAFRAGMA).
BOMBAS (CURVAS CARACTERÍSTICAS Y CAVITACIÓN)**

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La ecuación de Bernouilli (entre dos puntos 1 y 2) para un fluido que fluye en régimen estacionario por una conducción de sección circular variable puede expresarse como:

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2\alpha} + g(z_2 - z_1) + \left(\frac{p_2}{\rho_2} - \frac{p_1}{\rho_1} \right) + \Sigma F = W \quad (1)$$

Siendo:

$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2\alpha}$	variación de energía cinética.
$g(z_2 - z_1)$	trabajo que ejerce la fuerza de gravedad.
$\left(\frac{p_2}{\rho_2} - \frac{p_1}{\rho_1} \right)$	trabajo de las fuerzas de presión externas.
ΣF	energía que se disipa por fricción.
W	trabajo que ejerce una máquina.

Si se considera que entre los puntos 1 y 2 no hay bomba, que la tubería es horizontal y que se trata de un tramo corto de tubería lisa, reordenando, la ecuación quedaría de la siguiente forma:

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2\alpha g} + \frac{P_2 - P_1}{\rho g} = 0 \qquad \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} = \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} \quad (2)$$

De esta manera, si aumenta la energía cinética en el punto 2 (por ejemplo, debido a un estrechamiento), la presión estática debe disminuir en la misma proporción para que la suma siga siendo constante, de manera que se cumpla la ecuación de Bernouilli en cualquier sección de la conducción (S_1 o S_2) y para cualquier caudal circulante.

A partir de la ecuación (1) y combinándola con la ecuación de continuidad se puede calcular el caudal teórico que circula por la instalación. Para calcular el caudal real habrá que introducir un coeficiente C:

$$Q_{real} = \frac{C S_2}{\sqrt{1 - \frac{S_2^2}{S_1^2}}} \sqrt{2gh} \quad (3)$$

Siendo h la diferencia de altura entre las ramas manométricas entre los puntos 1 y 2.

En relación a las curvas características de una bomba y el fenómeno de la cavitación, consúltese la bibliografía.

2. OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

El objetivo de esta práctica es comprobar el teorema de Bernoulli, determinar las características de una bomba y estudiar la cavitación y las distintas aplicaciones prácticas del efecto Ventura.

3. MATERIAL NECESARIO

El equipo consta de tres depósitos diferentes (para la selección del depósito de trabajo se dispone de un desviador de flujo) y una bomba centrífuga que impulsa el agua procedente del depósito inferior de alimentación.

Las medidas de presión en los distintos puntos del sistema se pueden llevar a cabo con los siguientes dispositivos: vacuómetro y manómetro tipo Bourdon y manómetros diferenciales de columna de agua y mercurio. La regulación del caudal que circula por la instalación se realizará con la válvula de membrana y las válvulas de bola.

Para el estudio del efecto Ventura se dispone de dos tubos, uno de los cuales permite visualizar la cavitación.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

a.- Ecuación de Bernoulli

Se coloca el tubo de Venturi en la zona de ensayos conectando a él las distintas tomas manométricas, (el equipo estará preparado si, con la válvula de membrana cerrada, todas las columnas manométricas tienen la misma altura). Maniobrando a la vez con las válvulas de membrana y de bolas se ajusta el caudal para que la diferencia de presiones a lo largo del tubo Venturi esté dentro del rango de lecturas del manómetro. Se tomarán medidas tanto de las diferencias de presión en cada punto así como del caudal que circula por la instalación. Previamente debe adquirirse información sobre el caudal.

Es necesario medir la diferencia de presión entre puntos de igual sección, uno aguas arriba y otro aguas abajo, con el manómetro que se considere más apropiado según el rango de lectura, para calcular el coeficiente K del tubo de Ventura (pérdida de carga temporal y permanente). También se analizarán las medidas entre una toma aguas arriba y la garganta de Ventura para estudiar su utilización como medidor de caudal según la ec. (3).

d.- Utilización del Tubo de Venturi (cuadrado) para la mezcla de fluidos

- Mezcla de líquidos

Se llena con un poco de líquido el depósito volumétrico superior. Se conecta la toma existente en el depósito con la toma de la garganta Venturi. Así se observa como el líquido del depósito superior es succionado, incorporándose al flujo de agua. El caudal aspirado se puede calcular cronometrando el tiempo necesario para aspirar un volumen conocido.

- Mezcla de agua y aire

Con el depósito volumétrico superior vacío, se abre la válvula de bola inferior y se cierra la superior, para que el agua retorne directamente al depósito de alimentación. Se abre la toma existente en el depósito, de manera que tiene lugar la aspiración del aire exterior (se puede observar el burbujeo en el depósito de alimentación).

e.- Estudio de la cavitación

Se coloca el tubo de Venturi en la zona de ensayos. Se aumenta el caudal que circula por la instalación hasta que se produzca cavitación en la garganta (se medirá dicho caudal con el sistema más adecuado). Se conecta el vacuómetro a la garganta para medir la depresión existente. Será necesario conocer la presión atmosférica y la temperatura del agua en el depósito. Posteriormente se crea vacío en el depósito de alimentación extrayendo agua del mismo y llevándola al depósito volumétrico, para ello se tapan los orificios superiores. Se crean diferentes depresiones en el depósito de alimentación y se miden los caudales necesarios para que aparezca la cavitación para cada una de ellas.

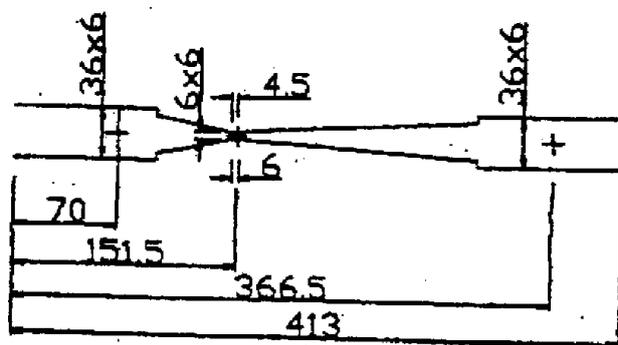


Figura 3.- Esquema de un Venturímetro cuadrado

5. TRATAMIENTO DE DATOS

a.- Ecuación de Bernouilli

Para cada uno de los caudales de trabajo y cada sección se construirán tablas de la forma:

Punto de medida	Diámetro conducción (mm)	Sección conducción (mm ²)	Velocidad media (m/s)	Altura cinética: H _c (mm)	Altura piezométrica: H _p (mm)	Altura total: H _c + H _p (mm)
-----------------	--------------------------	---------------------------------------	-----------------------	--------------------------------------	--	--

b.- Calibrado de un diafragma y del tubo Venturi

Se tomarán datos de caudal y diferencia de presiones generada para cada uno de ellos. Se empleará la ecuación (3)

c.- Curva característica de la bomba centrífuga

Q (L/min)	P _{vac} (cm Hg)	P _{man} (m.c.a)
-----------	--------------------------	--------------------------

d.- Utilización del tubo Venturi para la mezcla de fluidos

- Mezcla de líquidos

Se calculará la relación existente entre el caudal aspirado desde el depósito superior (q) y el caudal que circula por la instalación (Q).

- Mezcla de agua y aire

Solamente se realizará una visualización del fenómeno que tiene lugar.

e.- Estudio de la cavitación

Se analizará la relación que existe entre la presión existente en el depósito de alimentación y el caudal al que se produce la cavitación (fenómeno que se produce cuando en algún punto de la conducción se produce la presión de saturación para la temperatura de agua del depósito, transformándose en vapor, produciéndose la cavitación).

La altura cinética para el tubo Venturi se calcula como :

$$H_c = \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

A partir de los datos experimentales se comprobará la ecuación de Bernouilli, se calculará la constante del venturímetro y se analizará su utilización como medidor de caudal.

La carga total y la CNPA_{disponible} para la bomba se puede obtener a partir de la siguiente ecuación:

$$H = (h_2 - h_1) + \frac{P_{man}}{\rho g} \quad (5)$$

$$CNPA_{disponible} = (h_2 - h_1) + \frac{P_{atm} - P_{vac} - P_v}{\rho g} \quad (6)$$

Siendo h_1 , h_2 y h_3 , la altura de la toma de agua, de la descarga en el depósito y de la aspiración de la bomba (conexión del vacuómetro).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- ¿En que condiciones de operación existen más posibilidades de cavitación en la bomba?
- ¿cómo y donde conseguimos provocar la cavitación durante la realización de la práctica?
- ¿Cuáles son las condiciones de operación para experimentales para determinar la carga máxima de la bomba?
- ¿Qué hay que hacer para evitar que una bomba centrífuga se descebe?
- Estudiar el rango de operación de la bomba en función del CNPA_{requerido}.
- ¿Qué significado físico tiene el coeficiente de descarga en el venturímetro y en el diafragma? Orden de sus valores. ¿Se corroboraron experimentalmente? ¿Por qué?
- Añadir las observaciones personales sobre la práctica.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Levenspiel, O.; “Flujo de fluidos e intercambio de calor”; Ed. Reverté; Barcelona, 1993
- Costa Novella, E.; “Ingeniería química. Flujo de fluidos”; Vol. 3; Ed. Alhambra; Madrid, 1985

7. AISLAMIENTO TÉRMICO

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La transmisión de calor a través de sólidos opacos a la radiación está dominada por el fenómeno de conducción, al no existir el fenómeno de convección. Incluso en el caso de sólidos que permiten el paso de la radiación, a temperaturas similares a la ambiente ésta contribuye escasamente, de acuerdo con la Ley de Stefan-Boltzmann.

Así, la transmisión de calor en sólidos depende generalmente de la conductividad térmica, como la medida de la velocidad de transmisión de calor por conducción. Esta conductividad depende de la naturaleza del sólido.

El flujo de energía térmica a través de una pared homogénea y plana viene determinado por la convección térmica a través de las capas límite de aire sobre ambos lados de la pared, y la conducción de calor a través de la pared. En estado estacionario los tres flujos tienen que ser iguales, de manera que el flujo de energía depende del área superficial de la pared, de las diferencias de temperaturas entre cualesquiera de los medios en contacto y de los correspondientes coeficientes individuales de transmisión de calor (convección o conducción):

- Transmisión de calor aire-pared (interno):

$$Q = h_{int} \cdot A(t_{int} - t_{p int})$$

- Transmisión de calor pared-aire (externo):

$$Q = h_{ext} \cdot A(t_{p ext} - t_{ext})$$

- Conducción de calor a través de la pared:

$$Q = (k/L) \cdot A(t_{p int} - t_{p ext})$$

siendo k la conductividad térmica (coeficiente individual) y L el espesor de la pared.

A su vez, el flujo de calor Q a través de este sistema también puede expresarse considerando el sistema global aire-pared-aire, como:

$$Q = U \cdot A(t_{int} - t_{ext})$$

siendo U el coeficiente global de transmisión de calor.

En estado estacionario el flujo de calor, Q , tiene que ser el mismo. En consecuencia, teniendo en cuenta las expresiones anteriores y las relaciones entre las temperaturas incluidas en las mismas, se puede deducir la expresión para U :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{\text{int}}} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_{\text{ext}}}$$

El parámetro $K=L/k$ se denomina coeficiente de transmisión térmica, y depende únicamente de la conductividad térmica del material (que es prácticamente constante) y de su espesor.

Los inversos de h , K y U son los valores de las resistencias térmicas, respectivamente: resistencia ($1/h$) a la transferencia de calor por convección, resistencia (L/k) a la transmisión de calor por conducción y resistencia global ($1/U$) a la transmisión de calor.

En una pared que conste de varias capas sucesivas de distintos materiales sólidos la expresión anterior para $1/U$ es aplicable a todas las capas de materiales, de manera que la suma de las resistencias individuales a la transmisión de calor es igual a la resistencia global:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{\text{int}}} + \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4} + \frac{1}{K_5} + \dots + \frac{1}{K_n} + \frac{1}{h_{\text{ext}}}$$

2. OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

El objetivo de esta práctica es la determinación de la conductividad térmica de diferentes materiales sólido. En sentido inverso, una menor conductividad térmica deriva en un aislamiento térmico proporcionado por el material, lo que permite cuantificar la idoneidad de distintos materiales para ser empleados en aislamiento.

3. MATERIAL NECESARIO

El equipo a emplear consiste en una cámara o caja aislada, que permite la instalación de paneles de distintos materiales sobre una de sus caras, de manera que tanto desde el interior como desde el exterior de la caja es posible suministrar un flujo de calor a las paredes de dicha caja, mediante sendas bombillas de 60 W.

Se dispone también de paneles de distintos materiales (vidrio, Styropor, madera) que pueden ser asociados de diversas formas para la realización de los experimentos.

El equipamiento se completa con un sistema de medida de temperaturas mediante termopares, que se situarán en las paredes de los materiales de interés para la obtención de los datos experimentales.

La bombilla interior de 60 W con tapa protectora se utilizará para calentar el interior de la caja, permaneciendo su temperatura interior constante gracias a un termostato. El sensor de temperatura del termostato está fijado a la capa protectora de la bombilla y conectado al

termostato mediante una conexión de cinco clavijas en la base y un lado de la caja. La fuente de alimentación para la bombilla está conectada directamente al termostato.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En primer lugar, se elegirán los paneles de ensayo y se probará su montaje/sujeción en la caja.

Para la realización de los experimentos es necesario medir las temperaturas interior y exterior de la pared y del aire en cada caso, y las temperaturas entre placas en el caso de la instalación de una pared multiplaca. Para ello se empleará el sistema de termopares.

Para la medida de las temperaturas internas e intermedias, se introducirán los termopares usados a través de los agujeros practicados en las esquinas de la caja hasta insertar los termopares para medir la temperatura interior y de la cara interna de la pared. El termopar para la medida interior se introducirá unos 5 cm dentro de la caja.

Dado que existirá un gradiente de temperaturas con la altura en la caja, todas las medidas de temperatura deben realizarse a la misma altura.

Para la medida de temperaturas en la pared el extremo del termopar debe estar firmemente sujeto al nivel de los agujeros centrales y tan cerca como sea posible del centro de la pared. Los cables también deben fijarse a la caja para evitar que queden tensos.

Finalmente, para fijar la temperatura termostatada en el interior de la caja, se coloca el selector de temperaturas en la cuarta división de la escala graduada, de manera que se conseguirá (en el estado estacionario) una temperatura en el interior de la caja de unos 60 °C.

Se deberán proponer y realizar ensayos que permitan:

1. La determinación de la conductividad térmica de los materiales desconocidos, a partir de la conductividad térmica de los conocidos.
2. El comportamiento térmico con los materiales desconocidos frente a una fuente de calor externa, que incide alternativamente sobre dos paredes distintas de la caja.

5. TRATAMIENTO DE DATOS

Las temperaturas registradas serán empleadas para la determinación de las conductividades térmicas de los materiales para los que no se conozcan, a partir de los valores disponibles de aquellos conocidos recogidos en los *Handbook* de propiedades.

Deberá tenerse en cuenta el error experimental en la toma de medidas, incluyendo la realización de los ensayos necesarios para reducir su incidencia sobre los resultados.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al margen del análisis de los resultados numéricos obtenidos, la realización de esta práctica debería proporcionar respuestas a algunas cuestiones sobre los procesos estudiados. Se enumeran a continuación algunas de ellas:

¿A qué se debe el distinto comportamiento de la madera y el Styropor al variar la temperatura?
¿Por qué uno se enfría más rápidamente que el otro?

¿Por qué es conveniente esperar media hora antes de comenzar a iluminar las paredes de la caja?
¿Cómo se mejoraría el desarrollo de los experimentos?

¿Por qué han de ser constantes las temperaturas del aire interior y exterior?

¿Deben variar los valores de U de la pared y de k de las distintas placas al variar el orden de colocación de las mismas?

El valor de k obtenido para el aire, ¿es realmente una conductividad?

7. BIBLIOGRAFÍA

- Çengel, Y.A. “Transferencia de calor” 2ª edición, ed. McGraw-Hill, México, 2004.
- Welty, J.R. “Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer” 3ª edición, ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1984.
- Costa Novella, E. “Ingeniería Química – Vol. 4 Transmisión de Calor”, 1ª edición, ed. Alhambra, Madrid, 1986.
- Ocón-Tojo “Problemas de Ingeniería Química – Tomo I”, 2ª edición, ed. Aguilar, Madrid, 1967.

8. ESTUDIO DE UN CAMBIADOR DE CALOR (I): DOBLE TUBO Y PLACAS PLANAS

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Los mecanismos de transmisión de calor que predominan en un intercambio de calor son la convección de calor a través de los fluidos y la conducción de calor a través de la pared metálica que los separa. Considerando un elemento diferencial de una cambiador de longitud dL el calor transmitido por el fluido caliente será:

$$dq_c = m_c C_{pc} dT \quad (1)$$

donde dq_c es el flujo diferencial de calor ($\text{kcal} \cdot \text{h}^{-1}$), m_c el flujo másico y dT la diferencial de temperaturas. Integrando esta expresión entre los puntos 1 y 2 del cambiador (figura 1):

$$q_c = m_c C_{pc} (T_{c1} - T_{c2}) \quad (2)$$

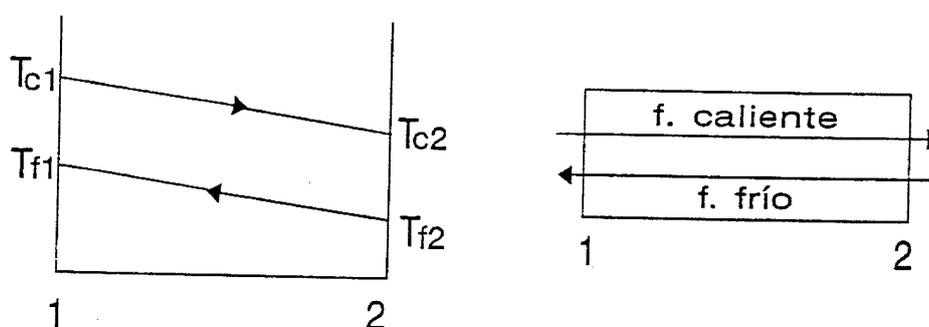


Figura 1.- Perfil de temperaturas del cambiador

La expresión integrada para la corriente del fluido frío es:

$$q_f = m_f C_{pf} (T_{f2} - T_{f1}) \quad (3)$$

El flujo de calor intercambiado en el cambiador vendrá dado por la ecuación de diseño:

$$q = U \cdot A \cdot (\Delta T)_{ml} \quad (4)$$

donde A es el área de intercambio de calor, U el coeficiente integral de transferencia de calor y $(\Delta T)_{ml}$ la diferencia de temperaturas media logarítmica entre los extremos frío y caliente del cambiador:

$$(\Delta T)_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (5)$$

Dependiendo del tipo de cambiador que se utilice, el cálculo del área de intercambio de calor y del coeficiente integral de transmisión de calor, variará. En el caso de un intercambiador de tubos concéntricos se ha de tener en cuenta que el área de transmisión de calor no es la misma para los dos fluidos. Por lo tanto el coeficiente U debe definirse siempre respecto de un área dada que

generalmente será el área externa del fluido que circula por el interior. Así, el coeficiente global vendrá definido por:

$$\frac{1}{U_0} = \frac{1}{h_0} + \frac{D_0}{D_i h_i} + \frac{D_0 \Delta x}{D_{ml} k} \quad (6)$$

donde h_0 y h_i son, respectivamente, los coeficientes de convección de los fluidos externo (espacio anular) e interno, D_i y D_0 los diámetros interno y externo del tubo interno, D_{ml} el diámetro medio logarítmico, Δx y k el espesor y el coeficiente de conducción del tubo interno. Cada uno de estos sumandos (ecuación 5) representa, respectivamente, la resistencia al flujo de calor del fluido externo, interno y a la conducción del metal.

Los coeficientes individuales, h_0 y h_i , dependen de las características y de los caudales de los fluidos que circulan:

$$h = f(\text{Re}, \text{Pr}) \quad (7)$$

donde:

$$\text{Re} = \frac{D_{eq} G}{\mu} \quad \therefore \quad \text{Pr} = \frac{C_p \mu}{k} \quad (8)$$

D_{eq} es el diámetro equivalente y G , C_p , k y μ son, el gasto, el calor específico, la conductividad térmica y la viscosidad del fluido.

El cálculo de los coeficientes individuales se realizará mediante la ecuación de Dittus-Boelter:

$$Nu = 0,023 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^n \quad (9)$$

Donde Nu es el número adimensional de Nusselt y n es un parámetro con valores de 0,3 para el enfriamiento y 0,4 para el calentamiento.

$$Nu = \frac{h \cdot D_{eq}}{k} \quad (10)$$

Para el cambiador de placas planas el cálculo de los coeficientes individuales es análogo, pero aplicando la siguiente expresión:

$$Nu = 0,026 \text{Re}^{0,65} \text{Pr}^n \quad (11)$$

2. OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

Un cambiador de calor es todo el dispositivo en el que se verifica un intercambio de calor entre dos fluidos separados por una pared. En esta práctica se pretende estudiar la dependencia del coeficiente de transferencia respecto del caudal del fluido que circula, así como corroborar el balance de calor de ambos fluidos. Posteriormente se calculará la eficacia en función del número de unidades de transferencia.

3. MATERIAL NECESARIO

La instalación consta de dos cambiadores (de tubos concéntricos y de placas) que funcionan en contracorriente. Se dispone de unas válvulas de aislamiento con el fin de dirigir los fluidos a uno u otro de los cambiadores. En los extremos se hallan dos válvulas de regulación de los caudales (mediante dos rotámetros) de los fluidos frío y caliente.

A la entrada y a la salida de cada uno de los intercambiadores se hallan unos termómetros que permiten medir las temperaturas de cada una de las corrientes. EL sistema se completa con una conducción que posee una válvula para realizar la purga de aire. Se deberá realizar un diagrama de flujo del equipo experimental.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En un primer paso se procede a determinar las dimensiones geométricas de los dos cambiadores de (de tubos y de placas) para el cálculo de las áreas de intercambio de calor.

Posteriormente se procede al calibrado de los rotámetros y de los termopares con baño de hielo y agua destilada hirviendo. El procedimiento experimental consiste en hacer circular agua caliente y fría por los cambiadores con una temperatura de entrada constante. Para ello se fija el caudal de entrada de una de las corrientes y se modifica el caudal de la otra para diferentes valores. Se mantienen cada uno de dichos caudales hasta que las temperaturas de los diferentes termopares permanezcan constantes con el tiempo.

Con objeto de disponer del intervalo de datos más amplio es conveniente trabajar con el caudal más alto (500 L/h) y más bajo posible (100 L/h) que permita el calentador e ir modificando el otro a intervalos regulares.

5. TRATAMIENTO DE DATOS

Los datos obtenidos experimentalmente se dispondrán en una tabla de la forma:

$Q_c (m^3 \cdot s^{-1})$	$Q_f (m^3 \cdot s^{-1})$	$T_e (°C)$	$T_s (°C)$	$t_e (°C)$	$t_s (°C)$
--------------------------	--------------------------	------------	------------	------------	------------

--	--	--	--	--	--

Donde Q_c y Q_f son los caudales de la corriente caliente y de la fría.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El cálculo del coeficiente integral de transmisión de calor experimental se realizará mediante los datos experimentales una vez determinados los valores del área y de la diferencia de temperaturas media logarítmica, así como el flujo de calor. El cálculo del coeficiente integral de transmisión de calor teórico se realizará mediante la ecuación de Dittus-Böelter. Calcular la eficacia en función del número de unidades de transferencia.

Comentar y comparar los resultados experimentales con los valores teóricos. Justificar la conveniencia o no de la utilización de ecuaciones teóricas (ec. Dittus-Böelter) para este caso. Corroborar los balances de transferencia de calor entre ambas corrientes. Evaluar, si es posible, las pérdidas de calor con el exterior.

Explicación de la ecuación de Dittus-Böelter y de los módulos adimensionales utilizados.

Ventajas e inconvenientes a escala industrial que presenta cada uno de los tipos de intercambiadores estudiados en esta práctica.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Bird, R.B., Stewart, W.E., Lighfoot, E.N., *Fenómenos de transporte*, Ed. Reverté, Barcelona, 1975.
- Levenspiel, O., *Flujo de calor e intercambio de calor*, Ed. Reverté, Barcelona, 1993.
- McCabe, L., Smith, J.C., Harriott, P., *Operaciones básicas de ingeniería química*, Ed. McGraw-Hill, Madrid, 1991.
- Treybal, R.E., *Operaciones de transferencia de masa*, Ed. McGraw-Hill, New York, 1991.
- Welty, J.R., Wicks, C.E., Wilson, R.E., *Fundamentals of momentum, heat and mass transfer*, Ed. John Wiley and Sons, New York, 1984.

9. ESTUDIO DE UN CAMBIADOR DE CALOR (II): DOBLE TUBO, CARCASA Y TUBOS, PLACAS PLANAS

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El flujo de calor desde un fluido a través de una pared sólida hasta otro fluido más frío se encuentra con frecuencia en procesos industriales. Los equipos en los que esto acontece se denominan intercambiadores de calor; en esta práctica se estudiarán diferentes tipos, y se efectuará una comparativa entre ellos.

El principio de los intercambiadores de calor se basa en la transmisión de energía calorífica entre dos fluidos a distintas temperaturas a través de la superficie de separación de los conductos de ambos, de manera que el fluido a mayor temperatura cede calor al fluido a menor temperatura. De este modo las temperaturas de ambos tienden a igualarse, consiguiendo el objetivo propuesto, que será en unos casos calentar un fluido y en otros enfriarlo.

Considerando calores específicos constantes en el rango de temperaturas de trabajo, el flujo de calor del fluido caliente al frío viene dado por la expresión:

$$Q_c = \dot{m}_c \cdot c_{p_c} \cdot \Delta T_c \quad (1)$$

donde Q_c se refiere al flujo de calor (J/s), \dot{m}_c es el caudal másico de fluido (kg/s), c_{p_c} el calor específico (J/kg·K) y ΔT_c la diferencia de temperatura del fluido entre la entrada y la salida.

Análogamente, el calor recibido por el fluido frío es:

$$Q_f = \dot{m}_f \cdot c_{p_f} \cdot \Delta T_f \quad (2)$$

significando el subíndice f que se trata del fluido frío y siendo ahora ΔT_c la diferencia entre la temperatura a la salida y la temperatura a la entrada.

Idealmente, el calor cedido por un fluido es igual al recibido por el otro; sin embargo, en la práctica esto no es así debido a que se producen unas pérdidas:

$$Q_c = Q_f + \text{pérdidas} \quad (3)$$

El flujo de calor también se puede expresar mediante la ecuación de diseño:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad (4)$$

siendo U el coeficiente integral de transferencia de calor, A el área de intercambio de calor y ΔT_{ml} la diferencia de temperaturas media logarítmica entre los extremos del cambiador.

La introducción del coeficiente integral de transmisión de calor permite aglutinar en un solo término las resistencias a la convección en un fluido, a la conducción en la pared y a la convección en el otro fluido. Su definición es la siguiente:

$$\frac{1}{U \cdot A} = \frac{1}{h_i \cdot A_i} + \frac{\Delta x}{k \cdot A_m} + \frac{1}{h_e \cdot A_e} \quad (5)$$

expresión en la que los subíndices i y e hacen referencia a uno y otro lado de la pared, A_m es el área promedio de la pared de intercambio y A toma el valor de A_i o de A_e según se defina en relación al área interna o a la externa.

Para el cálculo de los coeficientes h_i y h_e se encuentran correlaciones en la bibliografía en función del número de Nusselt, del que a su vez existen expresiones para calcularlo conociendo los números de Reynolds y Prandtl, para los distintos montajes. (Ver Práctica 17)

Se define la eficacia del cambiador como la relación entre el flujo de calor real y ese flujo si fuese el máximo. Esta eficacia es obtenible, basándose en el método de las unidades de transferencia, por medio de la expresión:

$$E = \frac{1 - \exp\left(-\frac{U \cdot A}{C_f} \cdot \left[\frac{C_f}{C_c} + 1\right]\right)}{1 + \frac{C_f}{C_c}} \quad (6)$$

simbolizando C_f y C_c , respectivamente, las *capacidades caloríficas* del fluido frío y del fluido caliente.

3. MATERIAL NECESARIO

3.1.- Cambiador de tubos concéntricos.

Compuesto por tubos concéntricos, el interior de acero, por el que circula el fluido caliente, y el exterior de metacrilato, por el que circula el fluido frío. Los diámetros interiores son de 10 y 14.5 mm, respectivamente, y la longitud de 955 mm, igual para ambos. El sistema permite su operación en corrientes paralelas y en contracorriente.

3.2.- Cambiador de carcasa y tubos.

Compuesto por un haz de nueve tubos de acero inoxidable por los que circula el fluido caliente, con un diámetro de interior de 7 mm y una longitud de 300 mm. En el interior de la carcasa, de metacrilato, circula, en contracorriente, el fluido frío. Existen una serie de placas deflectoras para aumentar el recorrido, su superficie es del 80% y su separación de 50 mm. El diámetro interno de la carcasa es de 200 mm.

3.3.- Cambiador de placas.

Compuesto por ocho placas metálicas, con un área de transferencia de calor de 0.06 m^2 .

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se realizarán una serie de experiencias con variaciones de caudal del fluido refrigerante a temperatura y caudal fijo de fluido calefactor con el fin de establecer diferencias y relaciones entre cada uno de los cuatro sistemas de cambiadores instalados: Placas, carcasa y tubos, tubos concéntricos en paralelo y contracorriente.

La temperatura del depósito de almacenamiento de agua caliente y su caudal se fijarán a un valor determinado, por ejemplo, 60 °C y 30 L/h. El fluido frío, cuya temperatura está determinada por la correspondiente a la red de suministro se introducirá con un determinado caudal, que será variado para la ejecución de diferentes experiencias (30 L/h, 20L/h y 40 L/h).

Con cada variación de caudal del fluido frío se esperará el tiempo necesario para permitir la estabilización del sistema, tomando medidas de temperatura a intervalos de 30 segundos, con el objeto de permitir definir el tiempo necesario para alcanzar el régimen estacionario.

Con información bibliográfica sobre las capacidades caloríficas de los fluidos empleados, y la datos obtenidos en la experiencia se procederá a determinar la densidad de flujo de calor y el coeficiente global de transmisión de calor; también se determinará la relación de cada uno de ellos con el caudal del fluido frío.

5. TRATAMIENTO DE DATOS

- Presentar un esquema de cada uno de los cambiadores de calor del montaje experimental, indicando las corrientes.
- Graficas del Perfil de temperaturas de cada cambiador en corriente directa y en contracorriente según proceda.
- Calculo de calores transmitido entre corrientes y de todas las variables necesarias para ello (A , ΔT_{ml} , U (experimental y mediante Dittus-Böelter), h , k , ...), indicando las simplificaciones realizadas.
- Cálculo de la eficacia de cada cambiador de calor y del NTU.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Comparación de los resultados obtenidos en los tres cambiadores de calor en contracorriente. Eran los esperados los resultados obtenidos.
- Comparación de los resultados obtenidos para un cambiador de calor en contracorriente y en corriente directa. Los resultados obtenidos eran los esperados.
- Corroborar los balances de transferencia de calor entre ambas corrientes. Evaluar, si es posible, las pérdidas de calor con el exterior.
- Comparación entre la $U_{exp.}$ y la $U_{teórica.}$ ¿A qué se pueden deber las diferencias?
- Explicación de la ecuación de Dittus-Böelter y de los módulos adimensionales utilizados.
- Ventajas e inconvenientes a escala industrial que presenta cada uno de los tipos de intercambiadores estudiados en esta práctica.
- En los intercambiadores de tubos concéntricos y de carcasa y tubos indicar que fluido (caliente o frío), circula normalmente por el interior. Razones.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Bird, R.B., Stewart, W.E., Lighfoot, E.N., *Fenómenos de transporte*, Ed. Reverté, Barcelona, 1975.
- Levenspiel, O., *Flujo de calor e intercambio de calor*, Ed. Reverté, Barcelona, 1993.
- McCabe, L., Smith, J.C., Harriott, P., *Operaciones básicas de ingeniería química*, Ed. McGraw-Hill, Madrid, 1991.
- Treybal, R.E., *Operaciones de transferencia de masa*, Ed. McGraw-Hill, New York, 1991.
- Welty, J.R., Wicks, C.E., Wilson, R.E., *Fundamentals of momentum, heat and mass transfer*, Ed. John Wiley and Sons, New York, 1984.