

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
Departamento de Ingeniería Química

IQ4801
LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA
Guía de Experiencias 2011

Profesores

Raúl Quijada
Jorge Castillo
Oswaldo Rodríguez
Javier Carrillo
Francisco Contreras
Rodrigo Varela
Javiera Gatica
M^a Fernanda Godoy

EXPERIENCIA 1

Escurrimiento de fluidos

Objetivo

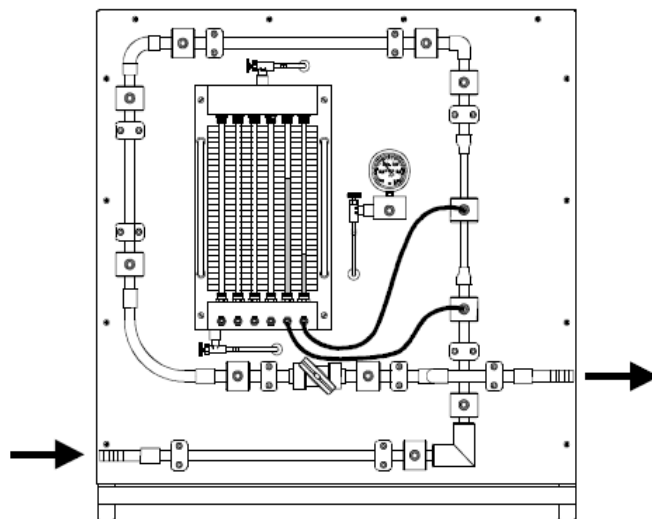
Debido a la importancia que tiene en el área de la Ingeniería de Procesos el transporte de fluidos, se incluye este experimento en que se analiza el comportamiento de un líquido al escurrir a través de un sistema de cañerías provisto de singularidades.

Se dispone de un equipo de escorrimento forzado de agua en el cual existe una serie de fittings y singularidades, en las cuales interesa determinar experimentalmente las pérdidas de carga y comparar dichos valores con aquellos que predice la teoría, para el régimen de circulación que corresponda.

Las pérdidas de carga a considerar son las que dicen relación con la fricción en tubos rectos y las pérdidas menores producidas cuando el fluido enfrente distintas singularidades.

Equipo

El equipo consiste en una cañería de PVC, por la cual circula agua impulsada por una bomba. El tramo de medición consta de un sistema de tubos con diferentes empalmes, una válvula de bola, una ampliación y una estrangulación. El caudal se puede variar con la válvula de bola. El equipo cuenta con un manómetro de 6 tubitos y un manómetro de tubo elástico para determinar las presiones relativas individuales. Las cámaras de medición anulares están montadas en el sistema de tubos para que la diferencia de presión se pueda medir en todos los objetos pertinentes.



Adicionalmente se evaluará el comportamiento de diferentes válvulas en función de la pérdida de carga que se producen debido a la presencia de ellas.

Bibliografía 1. Muñoz R., "Fluidodinámica", cap. 4.12, 4.18, 6.1-6.3, 6.5, Univ. de Chile, (1979).2. Perry and Chilton, "Chemical Engineer's Handbook", 5th ed., McGraw Hill Book (1973)

Experiencia N° 2

Motobomba

Introducción

En una planta de procesos el transporte de fluidos se realiza a través de un sistema de tuberías, donde lo que impulsa el movimiento de los fluidos son las bombas. Probablemente, estas máquinas son los instrumentos de transferencia de energía a un fluido más antiguos que se conozcan.

Actualmente existen varios tipos de bombas que se pueden clasificar en dos tipos: bombas de desplazamiento positivo y turbomáquinas. Dentro de estas últimas están las bombas centrífugas, que son las de mayor uso industrial. Están compuestas esencialmente por un rodete impulsor, dotado de paletas curvas, montado sobre un eje que gira en el interior de una caja espiral. Su funcionamiento consiste en que el fluido entra cerca del eje de rotación del impulsor que gira a alta velocidad. El líquido adquiere así energía cinética y es lanzado radialmente a alta velocidad hacia un difusor (o voluta). En éste, parte de la energía cinética del líquido se transforma en una elevación en la presión del líquido que es descargado al sistema de tuberías. En la figura 1 se ve la estructura básica de una bomba centrífuga.

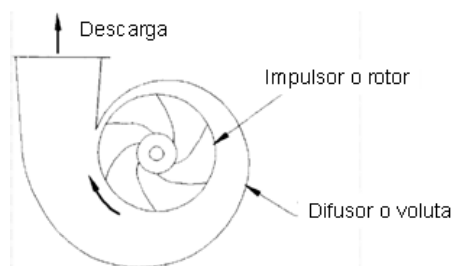


Figura 1. Bomba Centrífuga.

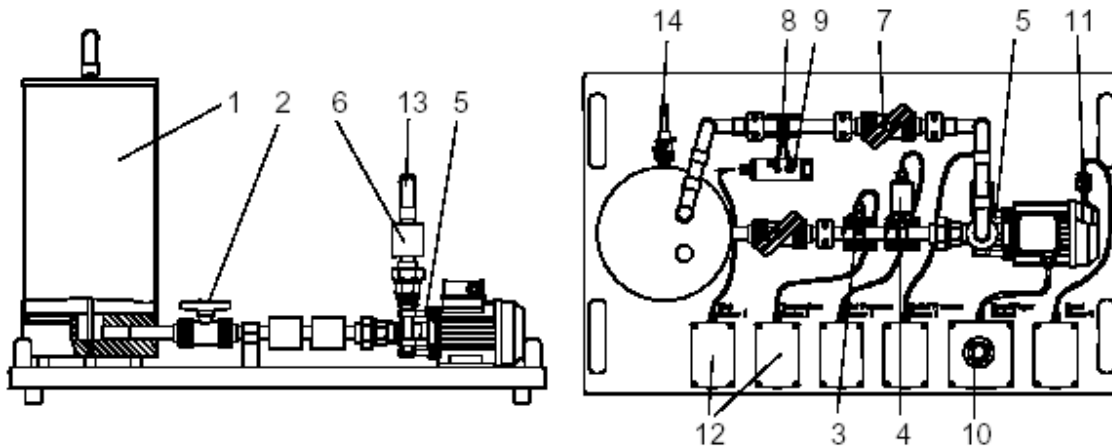
El comportamiento hidráulico de una bomba viene especificado en sus curvas características. Estas curvas son obtenidas experimentalmente por el fabricante y corresponden siempre a la misma velocidad de rotación de la bomba, al mismo impulsor y generalmente son obtenidas con agua a temperatura ambiente. En una curva característica se muestra una relación entre distintos valores de caudal proporcionado por la bomba y otros parámetros: altura de elevación, potencia efectiva y eficiencia o rendimiento de la bomba.

En ocasiones resulta de utilidad contar con algún medio para predecir el comportamiento de una bomba si cambiamos la velocidad de rotación o el diámetro del rotor. Este medio lo constituyen las leyes de semejanza dinámica, que resultan de aplicar un análisis dimensional a la bomba. Usando estas leyes se puede encontrar la curva característica para una misma bomba con otra velocidad de rotación o para una bomba homóloga con otro diámetro de rotor.

Objetivos

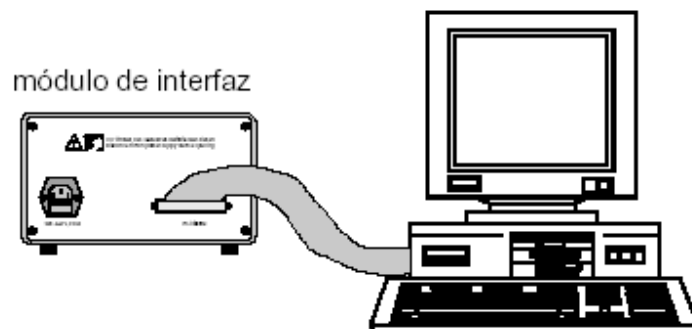
- Determinar las curvas características de una bomba de laboratorio.
- Comparar los valores experimentales con los teóricos.
- Encontrar las curvas características de una bomba con distinta velocidad de rotación mediante semejanza dinámica.

Equipo



El módulo de ensayo contiene la bomba centrífuga (5), los tubos, el depósito de reserva de agua (1), válvula de estrangulación de entrada (2), sensor de temperatura (3), sensor de presión de aspiración (4), sensor de presión de salida (6), válvula de estrangulación de salida (7), orificio de medición de caudal (8), sensor de presión diferencial (9), potenciometro (10), interruptor de proximidad inductivo para registrar las RPM (11) y cajas que protegen a la electrónica de los sensores (12.)

Los datos de la experiencia transfieren al PC y se registran en un software que es dirigido por el usuario.



EXPERIENCIA 3

a) Aparato visual de escurrimiento de fluidos

Objetivo

Los propósitos de esta experiencia son observar en forma visual los diferentes tipos de escurrimiento que puede experimentar un fluido y determinar experimentalmente los períodos de transición.

Equipo

El aparato consiste en un tubo de vidrio de diámetro igual a 1 cm y de largo igual a 90 cm, a través del cual escurre agua por gravedad desde un estanque ubicado en la parte superior del equipo.

Mediante la inyección de un colorante se puede observar el tipo de escurrimiento que presenta el fluido, reconocible por la rapidez de su difusión radial.

Procedimiento

Se efectuarán varias mediaciones, empezando por un pequeño flujo, en el cual se observa que el colorante sigue una estela bien definida. Al aumentar el flujo, llegará un momento en que el colorante difundirá rápidamente en el agua (período de turbulencia). Se debe medir el flujo de ambos regímenes y el punto de transición entre ambos.

Mediante una probeta de 2 litros y un cronómetro se determina el flujo de agua y se calcula la velocidad media del líquido en el tubo.

Cálculos

- Determine el número de Reynolds (Re) cuando se observa que el escurrimiento cambia de laminar a turbulento.

Bibliografía

1. Muñoz R., "Fluidodinámica", pp. 110-113, Univ. de Chile (1979).
2. Perry and Chilton, "Chemical Engineer's Handbook", pp 5-10, 5-20, 5-21, 5th ed., McGraw Hill Book Co (1973).
3. Zimmerman O.T. and Lavine, "Chemical engineering laboratory", p 18, Industrial Research Service, (1948).

b) Placa orificio

En esta experiencia se trabajará con tres distintas formas de medir caudal: Un rotámetro, un venturímetro y una placa orificio.

Objetivo

El propósito de esta experiencia es familiarizarse con los tres instrumentos de medición de caudal. Con el rotámetro, se confeccionará su curva de calibración. El la placa orificio y el tubo venturi deben ser caracterizados con su coeficientes de descarga en función del número de Reynolds.

Equipo

Se emplea el equipo HM150.13, provisto de una tubería de acrílico de 28,4 mm de diámetro, en la cual se encuentra, primero ubicada una placa-orificio y luego un tubo venturi. La contracción de ambos mide 14 mm. Éstos se pueden conectar a una serie de tubos piezométricos para medir las alturas de presión antes y después de las contracciones. Finalmente, se tiene el rotámetro de flotador para medir el caudal.

Procedimiento

Calibración del Rotámetro: Se fija un cierto caudal en la graduación del rotámetro y se mide el flujo como en la experiencia a).

Caracterización: Se registran la altura de presión antes y después de la placa orificio y antes y en la máxima contracción del venturi. Esto se hace para varios flujos distintos.

Cálculos

- Construir la curva de calibración del rotámetro.
- Construir en papel semi-log la curva C v/s Re (1).
- Para el máximo caudal, crear un gráfico de barras con las presiones a lo largo del Venturi.

Notas

(1) Calcular C mediante la relación:

$$v_0 = C \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H}}{\sqrt{1 - \left(\frac{D_0}{D_c}\right)^4}}$$

(2) Para el gasto máximo anotar las alturas de carga en cada punto y las distancias respectivas.

Nomenclatura

C: coeficiente de descarga del orificio

Re: número de Reynolds

v_0 : velocidad del fluido en el orificio (cm/s)

H: diferencia de presión (cm de fluido)

D_0 : diámetro del orificio (cm)

D_c : diámetro interior de la cañería (cm)

Bibliografía

1. Muñoz R., "Fluidodinámica", pp. 110-113, Univ. de Chile (1979).
2. Perry and Chilton, "Chemical Engineer's Handbook", 5th ed., McGraw Hill Book Co (1973).
3. Badger and Banchero, "Introduction to Chemical Engineering", cap. 3.37, 3.40, 3.41, (1955).
4. McCabe and Smith J.C., "Unit operations of chemical engineering", McGraw Hill Book Co.
5. Foust y Wenzel, "Principios de operaciones unitarias", ed. John Wiley & Sons.

EXPERIENCIA 4

Transferencia de oxígeno en un reactor

La transferencia gas-líquido es un fenómeno muy importante en numerosos procesos industriales. En particular, en los procesos de fermentación aeróbica, la transferencia de oxígeno constituye uno de los pasos limitantes.

Objetivo

El objetivo de la experiencia es determinar los coeficientes de transferencia de oxígeno en un reactor agitado y un reactor tipo airlift, durante las etapas de desoxigenación y oxigenación. Además, se estudiará el efecto de la velocidad de agitación sobre la transferencia de oxígeno.

Existen diversos métodos para determinar el coeficiente de transferencia. Todos están basados en la relación fundamental:

$$\frac{dC_L}{dt} = K_{La}(C_L^* - C_L) - Q_0$$

Donde C_L es la concentración de oxígeno en la solución (mg/L);

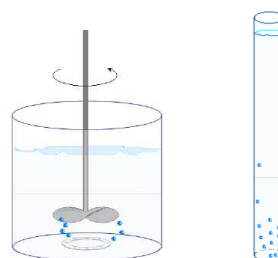
C_L^* es la concentración de saturación de oxígeno en la solución (mg/L);

K_{La} es el coeficiente de transferencia de oxígeno (1/s);

Q_0 es el consumo de oxígeno por unidad de volumen en el sistema (mg/L.s).

En esta experiencia se estudiará el Método Dinámico, para lo cual se cuenta con lo siguiente:

- electrodo de oxígeno disuelto
- reactor agitado de 10 [L]
- reactor tipo airlift
- balón de nitrógeno
- compresor de aire



Reactor agitado

Reactor tipo
Airlift

El sistema consiste en un reactor equipado con un inyector de gases. Mediante un juego de válvulas, se puede alimentar nitrógeno o aire. Un electrodo polarográfico de oxígeno disuelto permite medir la concentración de oxígeno disuelto en la solución. El electrodo se conecta a un amplificador de señal, el cual está a su vez conectado a un sistema automático de registro de datos.

Se saturará el fluido con oxígeno, se fijará la concentración de saturación; luego, se conectará la línea de nitrógeno para desorber el oxígeno, y, una vez que se alcance el mínimo, se volverá a suministrar aire.

Para preparar la experiencia

- Buscar cuáles son los distintos métodos para la determinación del K_{La} , con o sin consumo de oxígeno.
- Buscar cuáles son los órdenes de magnitud de los flujos de aire en biorreactores.
- Averiguar cuáles son las características de la solución que pueden determinar el K_{La} y la transferencia global de oxígeno en el sistema.

Bibliografía

- “Bioprocess Engineering Principles” (Pauline M. Doran)
- Cualquier libro que trate de transferencia de masa

EXPERIENCIA 5

Transferencia de Calor en Régimen Variable

Objetivo

Al introducir un cuerpo sólido en un fluido de mayor temperatura, se produce una transferencia de calor del fluido al sólido.

El objetivo de esta experiencia es determinar la conductividad térmica en cuerpos sólidos.

Dado el procedimiento seguido, se debe poner énfasis en que el método propuesto a continuación sólo es aplicable a materiales aislantes. El método propuesto hace uso de gráficos adimensionales.

Introducción teórica

El cálculo del coeficiente de conducción en materiales aislantes se puede hacer conociendo las variaciones que experimenta la temperatura en el centro de un sólido de geometría conocida, utilizando gráficos adimensionales obtenidos por la resolución de las ecuaciones que interpretan el comportamiento del sistema.

El gráfico adjunto proporciona la dependencia de ϕ_x (adimensional de temperatura) en función del producto $Bi \cdot Fo$, usando $1/Bi$ como parámetro. Como el producto $Bi \cdot Fo$ es independiente de K , a partir de las variaciones en el tiempo de las temperaturas en el centro del sólido por superposición de curvas se puede hallar Bi y a través de este el valor de K .

Para hacer uso de este método, es preciso conocer el coeficiente de transferencia de calor en la interfase que, para un sólido en un corriente de aire con un perfil de velocidad definido, está dado por:

$$Nu = B \cdot Re^n$$

en que n y B están dados para distintas geometrías del cuerpo y distintos valores de Re [1].

Para un prisma regular se cumple: $\phi_x = \sqrt{\phi}$

Equipo

El material cuya conductividad se desea determinar es un prisma de ladrillo refractario en cuyo interior va inserta una termocupla de Cu-constantan (plano de simetría), mediante la cual se medirá la temperatura en el interior del sólido.

Para generar una atmósfera caliente con un fluido bien definido, se dispone de un túnel de viento donde la velocidad y la temperatura del aire pueden variarse en torno a valores de:

$$v = 100 \text{ cm/s} \quad T_{\infty} = 60^{\circ}\text{C}$$

Se empleará además un registrador para medir las temperaturas, un termómetro (0-250°C) y un anemómetro para medir la velocidad del aire

Nomenclatura

$Bi = h^*L/K$ número de Biot

$Fo = K^*t/\Omega_s^*Cp^*L^2$ número de Fourier

$Nu = h^*\partial/K_f$ número de Nusselt

$Re = \Omega_f^*v^*\partial/\mu$ número de Reynolds

$\phi = (T-T_\infty)/(T_0-T_\infty)$ temperatura adimensional (se refiere al adimensional en una pared sometida a un cambio repentino en la temperatura del medio.

Cp calor específico del sólido (J/Kg.°C)

K condistividad térmica del sólido (Joule/m.s.°C)

K_f conductividad del fluido a la temperatura de film (J/m.s.°C)

L largo característico - espesor medio para la geometría de placa (m)

∂ largo característico (m) - se especifica en [1]

t tiempo

T temperatura en el centro del sólido (°C)

T_∞ temperatura en el seno del fluido (°C)

T_0 temperatura inicial en el centro del sólido (°C)

v velocidad del fluido (m/s)

Ω_f densidad del fluido (kg/m³)

Ω_s densidad del sólido (kg/m³)

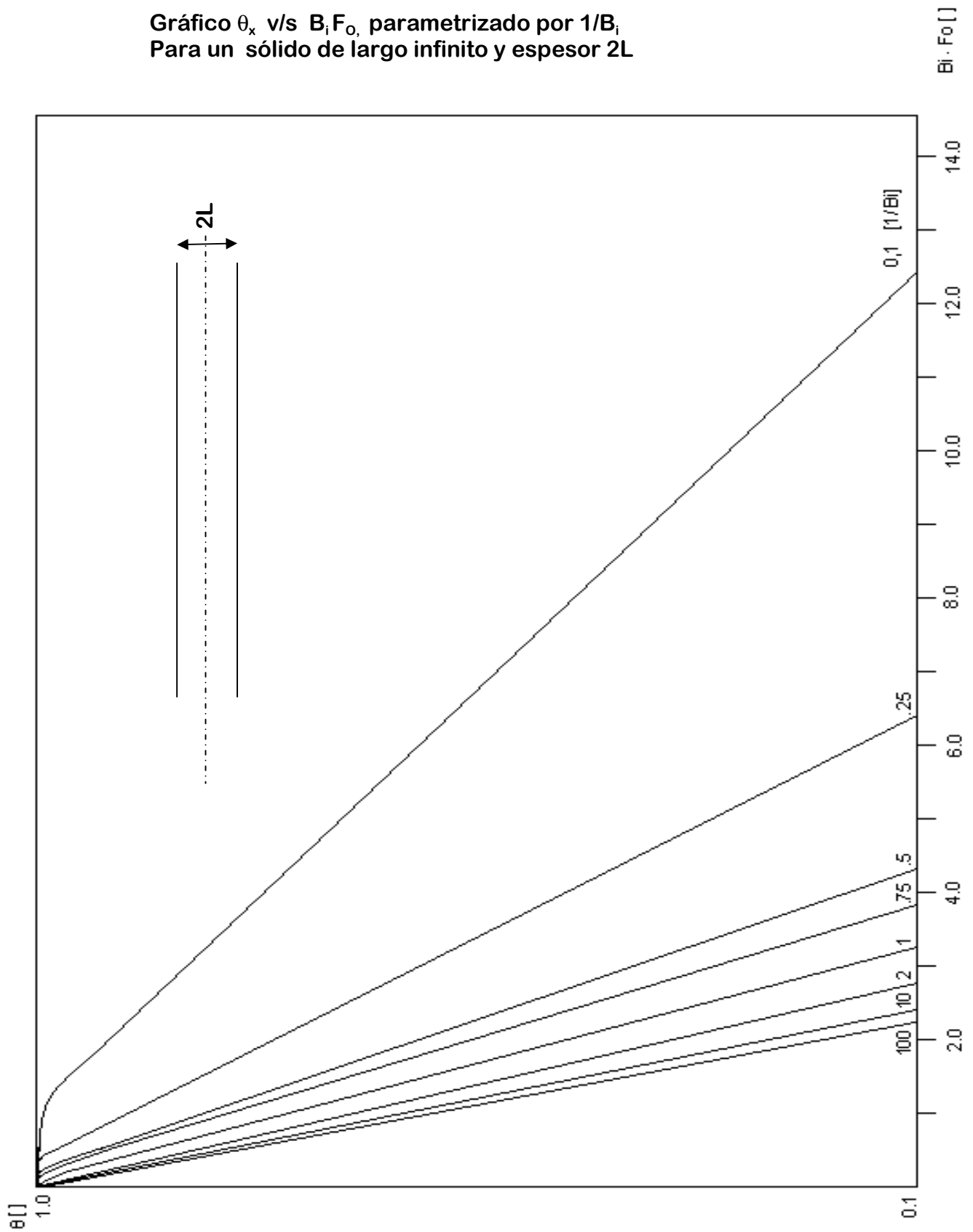
μ viscosidad dinámica del fluido (kg/m.s)

Bibliografía

1. Jakob M., "Heat Transfer", J. Willey, N.York (1949).
2. Kreith F., " Principles of heat transfer", International Textbook Co., 2nd ed (1965).
3. McAdams W.M., "Transmisión de calor", McGraw Hill, 8va ed. (1954).
- 4 Schneider P.J., "Temperature response charts", John Willey & Sons, N.York (1954).
5. Newman A.B., Trans. Quim. Inst. Chem. Eng., 27, 203 (1931).

Gráfico Experiencia 5

Gráfico θ_x v/s $B_i F_o$, parametrizado por $1/B_i$
 Para un sólido de largo infinito y espesor $2L$



EXPERIENCIA 6: LECHOS FLUIDIZADOS

Objetivo

Utilizando un equipo de fluidización con dos fluidos diferentes, aire comprimido y agua, se medirá la caída de presión del fluido a lo largo del lecho fluidizado.

También se determinará la velocidad mínima de fluidización para cada sistema por medio de dos métodos gráficos y se comparará con la que predice la teoría.

Introducción

La fluidización convierte un lecho de partículas sólidas en una masa suspendida, que se comporta en varios aspectos como un líquido. Esta masa tiene un ángulo de reposo igual a cero, busca su propio nivel y adopta la forma del recipiente que la contiene.

Los lechos fluidizados se utilizan en varias áreas de la industria: secado, reformado de hidrocarburos, tostado de sulfuros, transporte hidráulico o neumático, entre otros.

A partir del equilibrio de fuerzas de arrastre, peso y flotación, la caída de presión del fluido a través de la masa de partículas es:

$$\Delta P = g \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p} \right) h \rho_{ps}$$

Donde ρ_f es la densidad del fluido, ρ_p es la densidad de la partícula, ρ_{ps} la densidad de la masa de partículas en reposo, y h la altura de la masa.

La presión cae linealmente con la profundidad de inmersión en la masa, y :

$$P(y) = \frac{\Delta P}{h} y .$$

La velocidad mínima de fluidización (velocidad del fluido) se determina a partir del número de Re:

$$v_c = \frac{Re_c}{d_p} v_f$$

Donde v_f es la viscosidad cinemática del fluido. El número de Reynolds crítico:

$$Re_c = 42.86(1 - \varepsilon) \left(\sqrt{1 + 3.11 * 10^{-4} Ar \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2}} - 1 \right)$$

Se calcula utilizando el número de Arquímedes:

$$Ar = \frac{g d_p^3}{\nu^2} \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f}$$

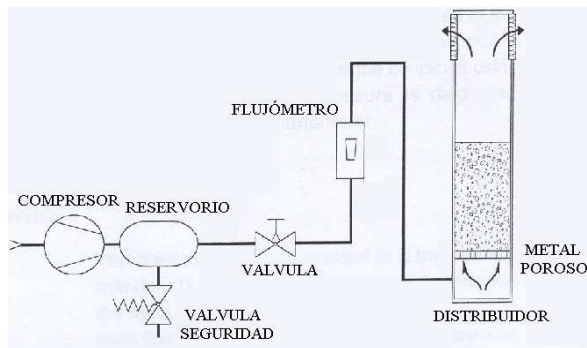
Y la fracción de huecos ε :

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{ps}}{\rho_p}$$

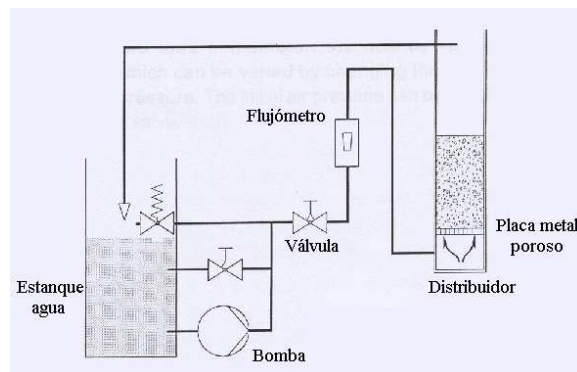
Equipo

El equipo para fluidización por aire comprimido consiste en un cilindro transparente, que contiene material sólido granulado. Desde el fondo del cilindro se sopla aire, el que pasa por un distribuidor, y cuyo flujo se regula mediante válvulas. Un flujómetro de área variable permite medir el flujo de aire, y un manómetro, la diferencia de presión a través de la masa de sólidos.

El equipo para fluidización por flujo de agua es similar al descrito; el agua está contenida en un tanque, y se mueve mediante una bomba de diafragma. El flujo de agua se mide con un flujómetro, y la diferencia de presión con un manómetro de dos tubos.



Equipo para lecho fluidizado, utilizando
aire comprimido



Equipo para lecho fluidizado, utilizando
agua

Procedimiento

Para el sistema de aire comprimido ya preparado, se aumenta progresivamente el flujo de aire, anotando el caudal y la diferencia de presión. Se debe notar especialmente el punto en que se detecta el primer movimiento de las partículas sólidas. El flujo a utilizar no debe exceder los 30 l/min.

Proceder de manera análoga para el sistema de agua, utilizando un flujo inferior a 1.5 l/min.

Cálculos

Para cada sistema, graficar la caída de presión versus la velocidad del fluido y la altura del lecho versus la velocidad del fluido. Indicar los puntos críticos en cada caso (detención en los incrementos de la caída de presión y variación en la altura del lecho). Comparar numéricamente con la teoría en términos de las velocidades mínimas de fluidización y las caídas de presión máximas.

Datos Adicionales:

- Área transversal de las columnas de cada lecho: 15,21 [cm²]
- Lecho con aire comprimido:
 - o Diámetro de partículas: 0,24 [mm]
 - o Densidad de masa de partículas en reposo: 1500 [kg/m³]
 - o Densidad de partículas: 2500 [kg/m³]
- Lecho con agua:
 - o Diámetro de partículas: 0,505 [mm]
 - o Densidad de masa de partículas en reposo: 1500 [kg/m³]
 - o Densidad de partículas: 2500 [kg/m³]

Bibliografía

- R. H. Perry. “Manual del Ingeniero Químico”. Tomo 2. 6^{ta} edición (3^{ra} edición en español). McGraw-Hill. México. 1992. p. 20-67 a 20-84.
- W. L. McCabe, J. C. Smith, P. Harriot. “Operaciones Básicas de Ingeniería Química”. 4^{ta} edición. McGraw-Hill. España. 1991. p. 171-184.

EXPERIENCIA 7 DESCARGA DE FLUIDOS

OBJETIVO

El objetivo de la experiencia es la determinación de los coeficientes de descarga, de contracción y velocidad, asociados a la descarga de fluido desde un estanque.

TEORÍA

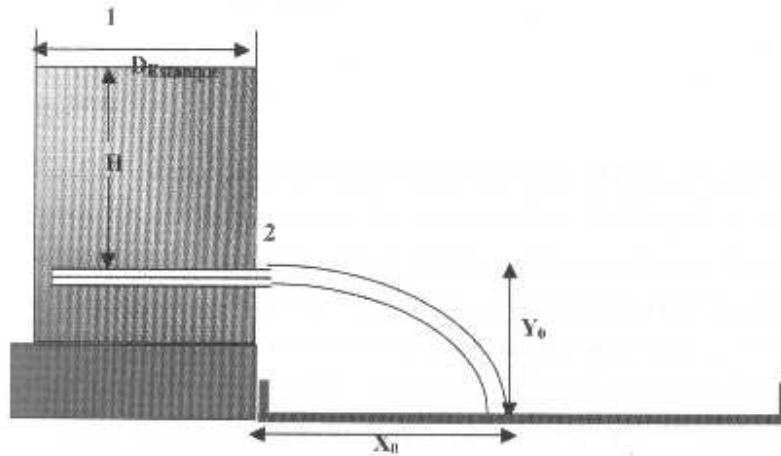
Se define el coeficiente de contracción como la razón entre el coeficiente de descarga y el coeficiente de velocidad:

$$C_c = \frac{C_d}{C_v}$$

donde el coeficiente de descarga está definido como la razón entre el caudal real y el caudal teórico de flujo por un orificio.

METODOLOGÍA

Para lo anterior se dispone del siguiente equipo:



Se dispondrá de un estanque de altura graduada, con un orificio en su parte inferior. Allí se podrán ajustar diferentes diámetros de orificio y con distinta geometría. Asimismo, se podrá medir la trayectoria de la curva que describe el fluido a medida que se descarga del estanque. En estas condiciones se recirculará el agua con una motobomba con el fin de mantener constante la altura del fluido. Apagando la bomba se podrá medir el tiempo de descarga del fluido desde el estanque.

BIBLIOGRAFÍA

1) Streeter Victor, Wylie Benjamin, "Mecánica de Fluidos", Ed. McGraw Hill, USA, 1988.

2) Roberto Muñoz, "Fluidodinámica", Universidad de Chile, 1979.

Experiencia 8

Estudio de Capa Límite

Objetivo

El estudio de una capa límite para el sistema aire sólido de una placa bajo inundación longitudinal permite obtener las distribuciones de velocidad en la interfase, esto tiene gran importancia en la caracterización de los Fenómenos de Transporte que ocurren en este sistema.

El objetivo de la experiencia es realizar un estudio de capa límite para una placa sumergida en aire longitudinalmente.

Introducción

Cuando se inunda una placa, se producen tantas capas límites laminares como turbulentas. Primero aparece la capa límite laminar con un perfil velocidad prácticamente lineal, provocada por la viscosidad del fluido. Cuando se supera un tramo de inundación determinado, la capa límite laminar se puede transformar en una capa límite turbulenta es más gruesa que la laminar y la velocidad a lo largo de la altura deja de ser lineal para convertirse en convexa.

El grosor en un punto de la capa límite disminuye con la velocidad. Por otro lado, a mayor distancia x respecto al borde de ataque, mayor grosor.

La magnitud relevante en este análisis es el número de Reynold Re , obtenido a la distancia x entre el punto de transición y el borde de ataque de la placa, y se calcula como:

$$Re = \frac{V * x}{\nu}$$

Donde:

V = velocidad del aire

x = distancia x entre el punto de transición y el borde de ataque de la placa

ν = viscosidad cinemática

$$\nu = \mu / \rho$$

μ = viscosidad
 ρ = densidad

La velocidad se calcula como:

$$V = \sqrt{\frac{2 * P_{din}}{\rho}}$$

Donde:

P_{din} = Presión dinámica
 ρ = Densidad

Equipo

El equipo disponible para realizar la experiencia consta de:

1 un Tunel de viento con capacidad de desarrollar velocidades hasta 25 m/s en una sección de 300 * 300 mm²

1 Placa milimetrada con mecanismo de ajuste horizontal

1 Sonda de Pitot con ajuste milimétrico y manómetro multitubos

Bibliografía

Bird, Stewart y Lightfoot, Fenómenos de Transportes, Ed. Reverte

Parte 2 Ensayo de Energía Eólica

La instalación consta de una estructura que soporta un generador de corriente con un eje que conecta a un aspa de madera.

El generador de corriente continua, está conectado a un Tester donde se medirá el Voltage y la Resistencia eléctrica del sistema para determinar la Potencia eléctrica de acuerdo a la Ley de Ohm:

$$P = V * I = V^2 / R$$

Con estos datos se construirá la curva de Potencia y de Coeficiente de Potencia en función de la velocidad, para 3 distintos tamaño de aspas, determinando la Potencia Eólica según:

$$P = \frac{1}{2} * C_p * \rho * A * v^3$$

donde:

P : Potencia Eólica

C_p : Coeficiente de Potencia o Rendimiento

ρ : Densidad del aire

A : Area de barrido de las aspas

V : velocidad del aire en el eje del rotación

