

8 Número de Reynolds, flujo laminar, flujo turbulento y pérdidas de energía debido a la fricción

8.1 Panorama

Mapa de aprendizaje

- En este capítulo comenzará a desarrollar sus habilidades para analizar la pérdida de energía que ocurre conforme los fluidos circulan en sistemas reales de tubería.
- Para analizar dichas pérdidas de energía debe usar el número de Reynolds, que caracteriza la naturaleza del flujo.
- Los flujos con número de Reynolds bajo son lentos y suaves, y se les conoce como flujos *laminar*.
- Los flujos con número de Reynolds elevado son rápidos e irregulares, y se les conoce como flujos *turbulentos*.
- La viscosidad del fluido es un componente crítico del número de Reynolds. Repase el capítulo 2.
- Las *pérdidas por fricción* ocurren conforme el fluido circula por tramos rectos en ductos y tuberías.
- Las pérdidas por fricción provocan que la presión disminuya a lo largo de la tubería e incrementan la potencia que una bomba debe transmitir al fluido.
- Tal vez haya observado que la presión disminuye entre la entrada de la toma y el extremo de un tramo largo de tubo, ducto, manguera de jardín o manguera contra incendios.

Descubrimientos

Si observa el flujo de agua en un simple grifo verá cómo cambia el carácter de su flujo conforme la velocidad se modifica.

- Describa la apariencia que tiene una corriente de agua al abrir una llave con velocidad de flujo muy lento.
- Después, abra despacio la llave por completo y observe cómo cambia el carácter del flujo de la corriente.
- Ahora cierre la llave con lentitud y cuidado, y observe las modificaciones en la apariencia del flujo mientras la velocidad vuelve a disminuir.
- Considere otros sistemas de fluido donde haya podido observar el cambio en la velocidad del flujo, de lento a rápido.
- ¿Qué pasa cuando fluye aceite frío en comparación con la forma en que lo hace el agua? Usted sabe que el aceite frío tiene una viscosidad mucho mayor que la del agua, y puede observar que escurre con más suavidad que ésta a velocidades comparables.
- Visite el sitio de Internet número 1 para ver una gráfica de la caída de presión versus el flujo volumétrico y la longitud de un tubo.

En este capítulo aprenderá que es posible caracterizar la naturaleza del flujo con el cálculo del *número de Reynolds*, que es adimensional y relaciona las variables importantes de los flujos: velocidad, tamaño de la trayectoria de flujo, densidad del fluido y viscosidad. También aprenderá a calcular las pérdidas de la energía debido a la fricción.

Conceptos introductorios

Cuando el agua sale de un grifo a velocidad muy baja, el flujo parece suave y estable. La corriente tiene un diámetro casi uniforme y hay poca o ninguna evidencia de que sus distintas partes se mezclan. A éste se le denomina *flujo laminar*, término derivado de la palabra *lámina*, debido a que el fluido parece moverse en láminas continuas con poca o ninguna mezcla de una capa con las adyacentes.

* *Layer*, en el original. N. del T.

Cuando el grifo está abierto casi por completo, el agua tiene una velocidad mayor. Los elementos del fluido parecen mezclarse en forma caótica dentro de la corriente. Ésta es la descripción general de un *flujo turbulento*.

Regrese al momento en que observaba el flujo laminar y abra lentamente el grifo. Conforme incrementaba la velocidad del flujo ¿notó que la corriente se volvía menos suave y desarrollaba ondulaciones a lo largo de su longitud? La sección transversal de la corriente parecería oscilar hacia dentro y hacia fuera, aun cuando el flujo fuera suave en general. Esta región del flujo recibe el nombre de *zona de transición*, y en ella el flujo cambia de laminar a turbulento. Las velocidades mayores producen más oscilaciones de ese tipo hasta que el flujo se vuelve turbulento, eventualmente.

El ejemplo del flujo de agua de un grifo ilustra la importancia de la velocidad de flujo para definir la índole del mismo. Hay otro parámetro que también es importante.

Repase el análisis del capítulo 2, en el que estudió la *viscosidad del fluido*. En él se definió tanto la viscosidad dinámica η , como la cinemática ν . Recuerde que $\nu = \eta/\rho$, donde ρ es la densidad del fluido. Ahí comentamos que los fluidos con viscosidad baja fluyen con mayor facilidad que los fluidos con viscosidad elevada. Para ayudarse en el repaso, considere las preguntas siguientes:

- ¿Qué fluidos poseen una viscosidad relativamente baja?
- ¿Qué fluidos poseen una viscosidad elevada?
- ¿Qué pasa cuando la temperatura se incrementa en relación con la facilidad con que se mueve un fluido con viscosidad alta?
- ¿Qué sucede cuando disminuye la temperatura de un fluido de viscosidad elevada?

Si calentamos un fluido de viscosidad alta, por ejemplo un aceite lubricante de motores, su viscosidad disminuye y permite que circule con más facilidad. Por el contrario, si reducimos su temperatura la viscosidad se incrementa y el aceite fluye más despacio. Esto ilustra el concepto de que la índole del flujo también depende de la viscosidad del fluido. Es más probable que el flujo de líquidos de viscosidad baja, como el agua, sea turbulento.

En este capítulo también veremos que el tamaño de la trayectoria del flujo afecta la índole de éste. Gran parte del trabajo tendrá que ver con flujo de fluidos que circulan a través de tuberías y ductos circulares, como los que estudió en el capítulo 6. El diámetro interior del flujo de la tubería desempeña un papel importante en la caracterización del flujo.

La figura 8.1 muestra una manera de visualizar el flujo laminar en un tubo circular. Anillos concéntricos de fluido circulan según una trayectoria recta y suave. Mientras el fluido se mueve a lo largo de la tubería, hay poca o ninguna mezcla a través de las *fronteras* de cada capa. Por supuesto, en los fluidos reales un número infinito de capas constituyen el flujo.

En la figura 8.2 presentamos otra manera de visualizar el flujo laminar. Ahí vemos un fluido transparente, como el agua, que fluye en un tubo de vidrio claro. Cuando una corriente

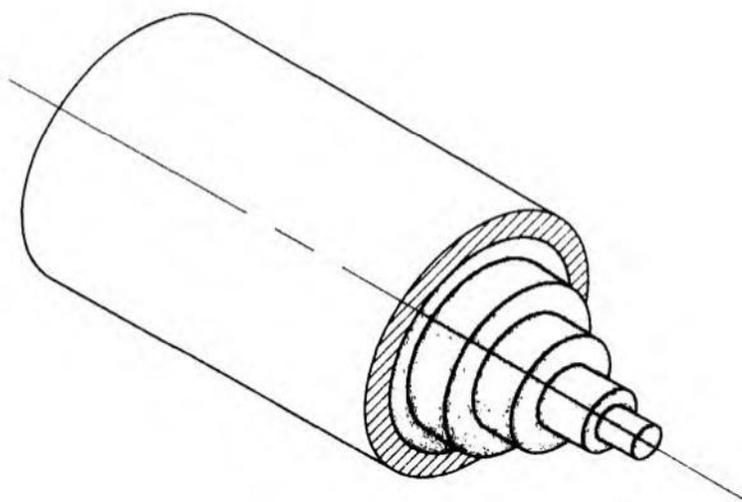
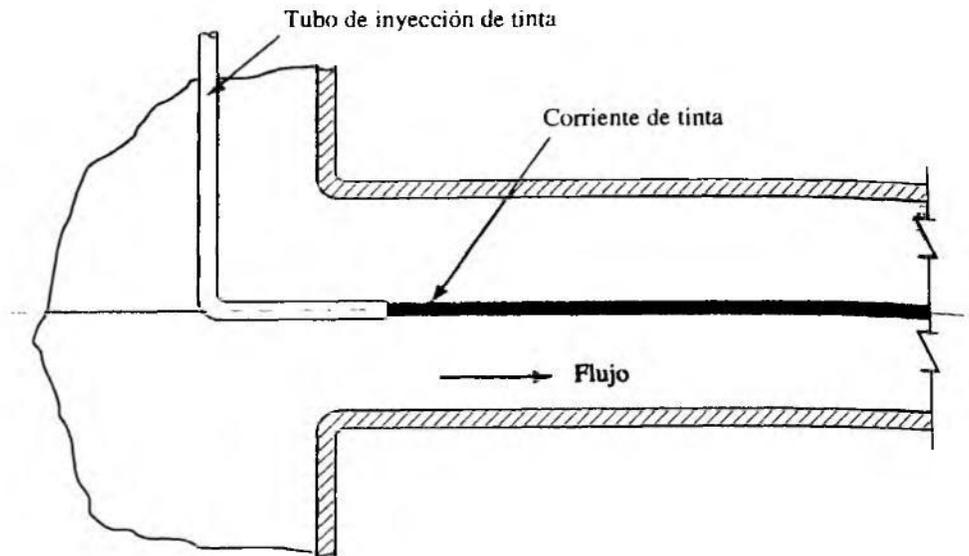


FIGURA 8.1 Ilustración del flujo laminar en un tubo circular.

FIGURA 8.2 Corriente de tinta en un flujo laminar.



de fluido oscuro, como la tinta, se inyecta en el fluido, la corriente permanece intacta mientras se mantenga el régimen laminar. La corriente de tinta no se mezclará con el cuerpo del fluido.

Al contrario que en el flujo laminar, el turbulento parece caótico e irregular y hay mucha mezcla del fluido. En la figura 8.3 mostramos que cuando se introduce tinta en el flujo turbulento, se disipa de inmediato en el fluido principal.

Además, una razón importante para crear el flujo turbulento es favorecer la mezcla en aplicaciones como las siguientes:

1. Mezcla de dos o más fluidos.
2. Acelerar reacciones químicas.
3. Incrementar la transferencia de calor hacia dentro o fuera del fluido.

El flujo en canales abiertos se da cuando una superficie de fluido está expuesta a la atmósfera. La figura 8.4 presenta un almacenamiento que descarga fluido a un canal abierto que eventualmente permite que la corriente caiga a un depósito más bajo. ¿Ha observado fuentes con esta característica?

Aquí, igual que en el flujo en una tubería, el flujo laminar parece ser suave y estar fragmentado en capas. La descarga del canal al depósito se asemejaría a una lámina lisa. El flujo turbulento parecería caótico. ¿Ha visto las cataratas del Niágara o alguna otra cascada donde el agua caiga rápido?

FIGURA 8.3 Mezcla de una corriente de tinta con un flujo turbulento.

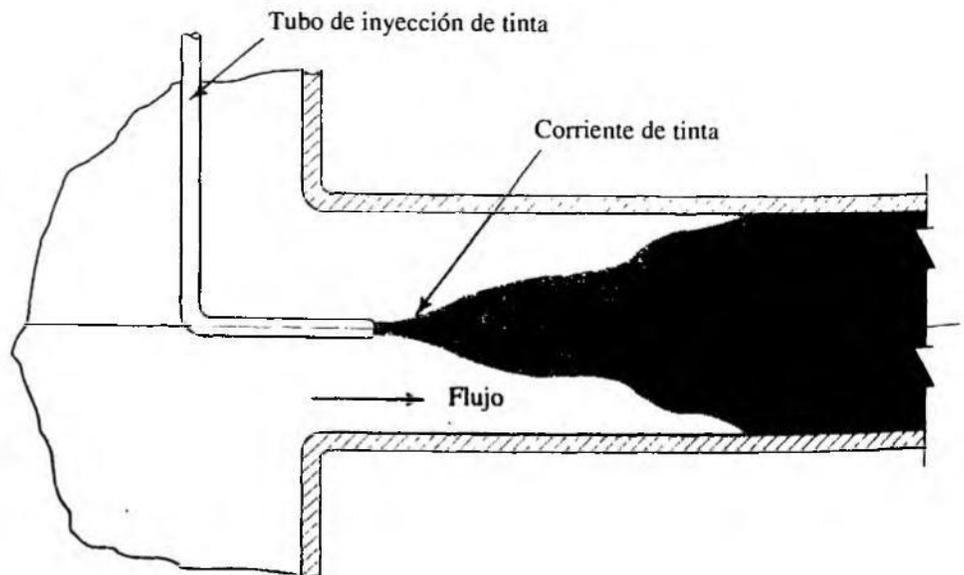
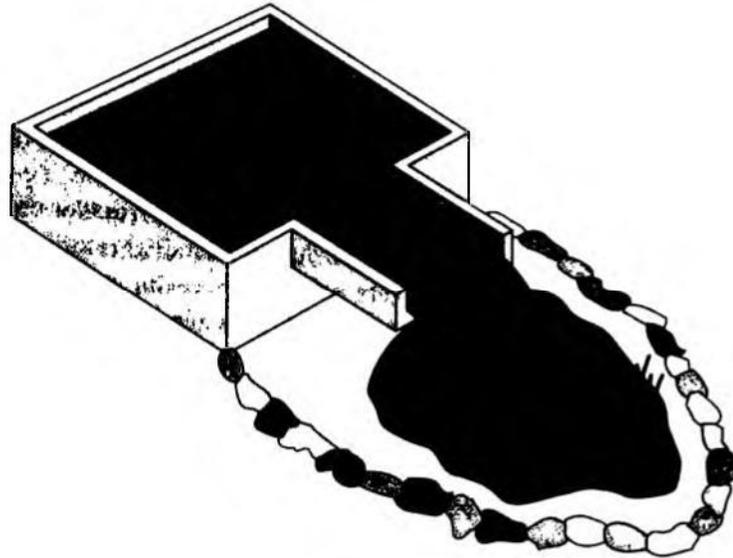


FIGURA 8.4 Flujo tranquilo (laminar) sobre una superficie plana.



En este capítulo aprenderá que es posible caracterizar un flujo por medio del cálculo de una cantidad adimensional, el *número de Reynolds*, que relaciona las variables importantes para el flujo: velocidad, tamaño de la trayectoria de flujo, densidad y viscosidad del fluido. Emplearemos con frecuencia estos conceptos en los capítulos 8 a 13.

En este capítulo nos limitamos a calcular el número de Reynolds para el flujo en tuberías y tubos cerrados, llenos y circulares. En el capítulo 9 estudiaremos el flujo en conductos no circulares, y en el capítulo 14 analizaremos el caso de los canales abiertos y las tuberías y los tubos que no se encuentran llenos.

Conforme el fluido fluye a lo largo de un tramo de tubería, manguera o tubo, su presión disminuye debido a la pérdida de energía, por la fricción que se crea en la interacción del fluido con la pared estacionaria y la turbulencia interna. Veamos algunos ejemplos:

- En un jardín, la presión de la manguera en la boquilla de salida o aspersor puede ser baja si la manguera es larga en exceso.
- La presión del agua en casa es baja si se localiza a una distancia grande de la fuente de suministro principal.
- Los ductos largos, como el oleoducto de Alaska que transporta petróleo, requieren de estaciones de bombeo a ciertos intervalos, con objeto de elevar de nuevo la presión a niveles adecuados después de que han disminuido por la fricción.
- Los sistemas de protección contra incendio deben diseñarse con mucho cuidado, de modo que la presión en el extremo de la boquilla sea apropiada para enviar un flujo volumétrico de agua suficiente.

8.2 OBJETIVOS

Al terminar este capítulo podrá:

1. Describir la apariencia del flujo laminar y el flujo turbulento.
2. Enunciar la relación empleada para calcular el número de Reynolds.
3. Identificar los valores límite del número de Reynolds, con los que se predice si el flujo será laminar o turbulento.
4. Calcular el número de Reynolds para el flujo de fluidos en tuberías y tubos.
5. Establecer la *ecuación de Darcy* para calcular la pérdida de energía, debido a la fricción, tanto para el flujo laminar como para el turbulento.
6. Enunciar la *ecuación de Hagen-Poiseuille* para determinar la pérdida de energía por fricción en el flujo laminar.
7. Definir el *factor de fricción*, según se utiliza en la ecuación de Darcy.
8. Determinar el factor de fricción por medio del diagrama de Moody para valores específicos del número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería.

9. Calcular el factor de fricción con las ecuaciones desarrolladas por Swamee y Jain.
10. Encontrar la pérdida de energía debido a la fricción, para el flujo en tuberías, mangueras y tubos, y emplear la pérdida de energía en la ecuación general de la energía.
11. Usar la fórmula de *Hazen-Williams* para calcular la pérdida de energía por fricción para el caso especial del flujo de agua en tuberías.

8.3 NÚMERO DE REYNOLDS

El comportamiento de un fluido, en particular en lo que se refiere a las pérdidas de energía, depende de que el flujo sea laminar o turbulento, como se demostrará después en este capítulo. Por esta razón, se necesita un medio para predecir el tipo de flujo sin tener que observarlo en realidad. Más aún, la observación directa es imposible para fluidos que van por tubos opacos. Se demuestra en forma experimental y se verifica de modo analítico, que el carácter del flujo en un tubo redondo depende de cuatro variables: la densidad del fluido ρ , su viscosidad η , el diámetro del tubo D y la velocidad promedio del flujo v . Osborne Reynolds fue el primero en demostrar que es posible pronosticar el flujo laminar o turbulento si se conoce la magnitud de un número adimensional, al que hoy se le denomina número de Reynolds (N_R). (Consulte el 2 sitio de Internet.) La ecuación siguiente muestra la definición básica del número de Reynolds:

$$N_R = \frac{vD\rho}{\eta} = \frac{vD}{\nu} \quad (8-1)$$

Estas dos formas de la ecuación son equivalentes debido a que $\nu = \eta/\rho$, como se vio en el capítulo 2.

Usted deberá manejar unidades consistentes para asegurar que el número de Reynolds sea adimensional. La tabla 8.1 lista las unidades requeridas, tanto en el SI como en el sistema tradicional de Estados Unidos. Se le recomienda hacer las conversiones a estas unidades estándar antes de sustituir los datos en el cálculo de N_R . Por supuesto, podría sustituir en el cálculo los datos dados en sus propias unidades y realizar las conversiones apropiadas una vez terminado. Es recomendable repasar el estudio de la viscosidad en las secciones 2.2 y 2.3 del capítulo 2. Consulte en el apéndice K los factores de conversión.

Es posible demostrar que el número de Reynolds es adimensional, con la sustitución de las unidades estándar del SI en la ecuación (8-1):

$$N_R = \frac{vD\rho}{\eta} = v \times D \times \rho \times \frac{1}{\eta}$$

$$N_R = \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \text{m} \times \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{\text{m} \cdot \text{s}}{\text{kg}}$$

Debido a que todas las unidades se cancelan, N_R es adimensional.

El número de Reynolds es uno de varios números adimensionales, útiles en el estudio de la mecánica de fluidos y la transferencia de calor. Puede emplearse el proceso conocido como *análisis dimensional* para determinar números adimensionales. (Consulte la referencia 1.)

TABLA 8.1 Unidades estándar para las cantidades utilizadas en el cálculo del número de Reynolds, con el fin de garantizar que sea adimensional.

Cantidad	Unidades del SI	Unidades tradicionales de EE
Velocidad	m/s	pie/s
Diámetro	m	pie
Densidad	kg/m ³ o N·s ² /m ⁴	slugs/pie ³ o lb·s ² /pie ⁴
Viscosidad dinámica	N·s/m ² o Pa·s o kg/m·s	lb·s/pie ² o slugs/pie·s
Viscosidad cinemática	m ² /s	pie ² /s

El número de Reynolds es la relación de la fuerza de inercia sobre un elemento de fluido a la fuerza viscosa. La fuerza de inercia se desarrolla a partir de la segunda ley del movimiento de Newton $F = ma$. Como se vio en el capítulo 2, la fuerza viscosa se relaciona con el producto del esfuerzo cortante por el área.

Los flujos tienen números de Reynolds grandes debido a una velocidad elevada y/o una viscosidad baja, y tienden a ser turbulentos. Aquellos fluidos con viscosidad alta y/o que se mueven a velocidades bajas, tendrán números de Reynolds bajos y tenderán a comportarse en forma laminar. En la sección siguiente proporcionamos algunos datos cuantitativos con los cuales predecimos si un sistema de flujo dado será laminar o turbulento.

La fórmula para el número de Reynolds adopta una forma diferente para secciones transversales que no sean circulares, canales abiertos y el flujo alrededor de cuerpos sumergidos. Estudiaremos estas situaciones en otra parte de este libro.

8.4 NÚMEROS DE REYNOLDS CRÍTICOS

Para aplicaciones prácticas del flujo en tuberías, encontramos que si el número de Reynolds para el flujo es menor que 2000, éste será laminar. Si el número de Reynolds es mayor que 4000, el flujo será turbulento. En el rango de números de Reynolds entre 2000 y 4000 es imposible predecir qué flujo existe; por tanto, le denominaremos *región crítica*. Las aplicaciones prácticas involucran flujos que se encuentran bien dentro del rango laminar o bien dentro del turbulento, por lo que la existencia de dicha región de incertidumbre no ocasiona demasiadas dificultades. Si se encuentra que el flujo en un sistema se halla en la región crítica, la práctica usual es cambiar la tasa de flujo o diámetro del tubo para hacer que el flujo sea en definitiva laminar o turbulento. Entonces es posible realizar análisis más precisos.

Con la minimización cuidadosa de las perturbaciones externas es posible mantener el flujo laminar para números de Reynolds tan grandes como 50 000. Sin embargo, cuando N_R es mayor que 4000, una perturbación pequeña en la corriente ocasionará que el flujo cambie de forma súbita de laminar a turbulento. Por esta razón, y porque en este libro estudiamos aplicaciones prácticas, supondremos lo siguiente:

Si $N_R < 2000$, el flujo es laminar.

Si $N_R > 4000$, el flujo es turbulento.

PROBLEMA MODELO 8.1

Determine si el flujo es laminar o turbulento si fluye glicerina a 25 °C en una tubería cuyo diámetro interior es de 150 mm. La velocidad promedio del flujo es de 3.6 m/s.

Solución

Primero debe evaluarse el número de Reynolds por medio de la ecuación (8-1):

$$N_R = vD\rho/\eta$$

$$v = 3.6 \text{ m/s}$$

$$D = 0.15 \text{ m}$$

$$\rho = 1258 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{del apéndice B})$$

$$\eta = 9.60 \times 10^{-1} \text{ Pa}\cdot\text{s} \quad (\text{del apéndice B})$$

Entonces, tenemos

$$N_R = \frac{(3.6)(0.15)(1258)}{9.60 \times 10^{-1}} = 708$$

Como $N_R = 708$, menor que 2000, el flujo es laminar. Observe que cada término se expresó en unidades consistentes del SI antes de evaluar N_R .