

EMACSA

Manual de Hidráulica Básica

Formación técnica EMACSA

Información del Documento

Título del documento	Manual de Hidráulica Básica
Tipo de documento	Manual de formación
Descripción	Manual formativo sobre fundamentos de hidráulica, hidrostática, redes de distribución y fenómenos hidráulicos.
Nivel de seguridad recomendado	PÚBLICO
Propietario del documento	Empresa Municipal de Aguas de Córdoba S.A (EMACSA)

INDICE

Información del Documento.....	1
1. Introducción e Hidrostática.....	3
1.1. Introducción a la Hidráulica en el Ciclo del Agua	3
1.2. Concepto de Presión	3
1.3. Ecuación Fundamental de la Hidrostática	3
1.4. Presión sobre Paredes Laterales	3
2. Hidrodinámica Básica: Caudales y Continuidad	5
2.1. Caudal y Ecuación de Continuidad	5
2.2. Llenado y Vaciado de Depósitos (Tiempos y Diámetros)	5
3. Teoremas Fundamentales del Flujo	7
3.1. Tipos de Flujos (Número de Reynolds).....	7
3.2. Teorema de Bernoulli	7
3.3. Línea de Energía y Línea Piezométrica.....	7
3.4. Teorema de Torricelli	8
4. Pérdidas de Carga y Fenómenos Especiales.....	9
4.1. Pérdidas de Carga en Conducciones (Rozamiento)	9
4.2. Pérdidas Localizadas (Elementos y Accesorios).....	9
4.3. El Golpe de Ariete	9
4.4. El Resalto Hidráulico	9
5. Ejercicios Propuestos.....	10
5.1. Bloque 1: Hidrostática y Caudales	10
5.2. Bloque 2: Teoremas y Fenómenos Hidráulicos.....	10
6. Solucionario.....	11
6.1. Soluciones al Bloque 1	11
6.2. Soluciones al Bloque 2	11

1. Introducción e Hidrostática

1.1. Introducción a la Hidráulica en el Ciclo del Agua

La hidráulica es la rama de la física y la ingeniería que se encarga del estudio de las propiedades mecánicas de los fluidos, en nuestro caso, el agua. Para un técnico especialista en el ciclo integral del agua, comprender la hidráulica es fundamental: desde la captación en embalses, pasando por la potabilización (ETAP), la distribución a las ciudades, hasta la depuración de las aguas residuales (EDAR) y su devolución al medio natural.

1.2. Concepto de Presión

En los fluidos, la fuerza no se aplica en un solo punto, sino que se reparte por toda la superficie de contacto. La **presión (P)** se define como la **fuerza (F)** ejercida por unidad de **área (A)**.

$$\text{Fórmula de la Presión: } P = F / A$$

Unidades más utilizadas:

Pascal (Pa): Es la unidad del Sistema Internacional ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$).

Bar: Muy común en la industria ($1 \text{ bar} = 100.000 \text{ Pa}$).

Metros de Columna de Agua (m.c.a.): Muy usada en hidráulica. 10 m.c.a. equivalen aproximadamente a 1 bar (o 1 kg/cm^2).

1.3. Ecuación Fundamental de la Hidrostática

La hidrostática estudia los fluidos en reposo. En un depósito o en el mar, la presión aumenta a medida que descendemos, debido al peso del agua que tenemos encima. La ecuación fundamental de la hidrostática relaciona la presión con la profundidad.

$$P = \gamma \cdot h$$

Donde **P** es la presión hidrostática, **γ** es el peso específico del fluido (para el agua pura es 9810 N/m^3), y **h** es la profundidad desde la superficie libre.

1.4. Presión sobre Paredes Laterales

A diferencia del fondo de un depósito, donde la presión es constante, en las paredes laterales la presión varía: es nula en la superficie libre y máxima en el fondo. Esto genera una distribución de presiones en forma de triángulo (diagrama de presiones).

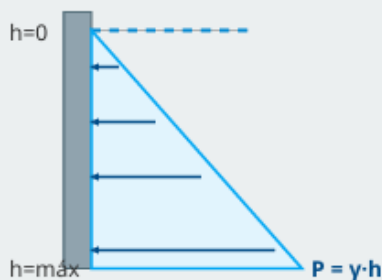


Figura 1. Distribución triangular de la presión hidrostática sobre una pared vertical.

Para calcular la **fuerza resultante (F)** sobre una pared rectangular de ancho **b** y altura de agua **h**, se multiplica la presión media (la que hay a media profundidad) por el área mojada:

$$F = P_{\text{media}} \cdot A = (\gamma \cdot h/2) \cdot (b \cdot h) = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot b \cdot h^2$$

Problema Resuelto 1: Empuje sobre la pared de un decantador

Enunciado: En una EDAR, el muro lateral de un decantador secundario tiene 6 metros de ancho (**b**). El decantador está lleno de agua hasta una profundidad de 4 metros (**h**). Calcula la presión en el fondo y la fuerza total (empuje hidrostático) que soporta dicho muro. Dato: $\gamma = 9810 \text{ N/m}^3$.

Solución:

1. Presión en el fondo:

Aplicamos la ecuación fundamental: $P = \gamma \cdot h = 9810 \cdot 4 = 39.240 \text{ Pa}$ (aprox. 0,39 bar).

2. Fuerza total sobre el muro:

Aplicamos la fórmula del área del triángulo de presiones (o presión media por área):

$$F = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot b \cdot h^2$$

$$F = 0,5 \cdot 9810 \cdot 6 \cdot 4^2 = 0,5 \cdot 9810 \cdot 6 \cdot 16 = 470.880 \text{ N}$$

Respuesta: El muro debe estar diseñado estructuralmente para soportar una fuerza de 470,88 kN (kilonewtons).

2. Hidrodinámica Básica: Caudales y Continuidad

2.1. Caudal y Ecuación de Continuidad

El **caudal (Q)** es el volumen de fluido que atraviesa una sección transversal de una tubería o canal en una unidad de tiempo. Es el parámetro más importante en el dimensionamiento de las redes de agua.

Podemos calcular el caudal de dos formas equivalentes:

- Relacionando volumen y tiempo: $Q = V / t$ (donde V es el volumen y t es el tiempo).
- Relacionando velocidad y área: $Q = v \cdot A$ (donde v es la velocidad del flujo y A es el área de la sección interior de la tubería).

Ecuación de Continuidad: Si no hay fugas ni aportes, el caudal que entra en una tubería es el mismo que sale, aunque la tubería cambie de diámetro.

$$Q_1 = Q_2 \Rightarrow v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2$$

Conclusión: Si la tubería se estrecha (menor área), el agua debe ir más rápido (mayor velocidad) para que pase el mismo caudal.

2.2. Llenado y Vaciado de Depósitos (Tiempos y Diámetros)

En el diseño de instalaciones de agua es habitual calcular cuánto tardará un depósito en llenarse o vaciarse con una bomba determinada, o qué diámetro de tubería necesitamos para cumplir con un tiempo de llenado exigido.

Para tubos circulares, recordando que el área es $A = \pi \cdot D^2 / 4$ (donde D es el diámetro interior), podemos despejar el diámetro necesario si conocemos el caudal y fijamos una velocidad de diseño (habitualmente entre 1 y 2 m/s para evitar ruidos y exceso de pérdida de carga).

Problema Resuelto 2: Tiempo de llenado de un depósito

Enunciado: Un depósito cilíndrico de almacenamiento de agua tratada tiene 10 metros de diámetro y 5 metros de altura útil. Se abastece con una bomba que impulsa un caudal constante de 50 litros por segundo. ¿Cuánto tiempo tardará en llenarse por completo? Expresa el resultado en horas.

Solución:

1. Calcular el volumen del depósito (V):

$$V = \text{Área}_{\text{base}} \cdot \text{altura} = (\pi \cdot r^2) \cdot h = (\pi \cdot 5^2) \cdot 5 = 3,1416 \cdot 25 \cdot 5 = 392,7 \text{ m}^3.$$

2. Pasar el caudal a unidades del Sistema Internacional (m³/s):

$$Q = 50 \text{ l/s} = 0,050 \text{ m}^3/\text{s}.$$

3. Calcular el tiempo (t):

Como $Q = V / t$, despejamos $t = V / Q$.

$$t = 392,7 / 0,050 = 7854 \text{ segundos}.$$

4. Convertir a horas:

$$t_{\text{horas}} = 7854 / 3600 = 2,18 \text{ horas}.$$

Respuesta: El depósito tardará 2 horas y unos 11 minutos en llenarse.

Problema Resuelto 3: Cálculo del diámetro de una tubería para llenado

Enunciado: Se requiere llenar una piscina de 180 m³ en exactamente 4 horas utilizando una tubería que aporta agua desde la red general. Por normativa interna de la instalación, la velocidad del agua por la tubería no debe superar los 1,5 m/s. Calcula el diámetro interior mínimo que debe tener esta tubería (en milímetros).

Solución:**1. Calcular el caudal necesario (Q):**

$$\text{Tiempo en segundos} = 4 \text{ h} \cdot 3600 \text{ s/h} = 14.400 \text{ s}.$$

$$Q = V / t = 180 \text{ m}^3 / 14.400 \text{ s} = 0,0125 \text{ m}^3/\text{s}.$$

2. Calcular el área necesaria de la tubería (A):

Sabiendo que $Q = v \cdot A$, despejamos el área: $A = Q / v$.

$$A = 0,0125 / 1,5 = 0,00833 \text{ m}^2.$$

3. Despejar el diámetro (D):

Sabiendo que $A = (\pi \cdot D^2) / 4$, despejamos D:

$$D^2 = (4 \cdot A) / \pi = (4 \cdot 0,00833) / 3,1416 = 0,0106 \text{ m}^2.$$

$$D = \sqrt{0,0106} = 0,103 \text{ m}.$$

Respuesta: El diámetro interior mínimo debe ser de 0,103 metros, es decir, **103 mm**. Comercialmente se elegiría la tubería inmediatamente superior (por ejemplo, DN 110 mm o 125 mm).

3. Teoremas Fundamentales del Flujo

3.1. Tipos de Flujos (Número de Reynolds)

Para clasificar el comportamiento del flujo en el interior de una conducción, en hidráulica empleamos un parámetro adimensional llamado **Número de Reynolds (Re)**, que relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas viscosas del fluido.

Flujo Laminar (Re < 2000): El agua se mueve en láminas paralelas, ordenadas y sin mezclarse.

Flujo de Transición (2000 < Re < 4000): Es un estado inestable donde aparecen pequeñas fluctuaciones.

Flujo Turbulento (Re > 4000): Las partículas de agua se mueven de forma caótica y se cruzan. Es el flujo habitual en las tuberías de abastecimiento y saneamiento.

3.2. Teorema de Bernoulli

El Teorema de Bernoulli representa el principio de conservación de la energía aplicado a los fluidos. Establece que, en un fluido ideal (incompresible y sin rozamiento), la energía total a lo largo de una línea de corriente permanece constante.

La energía en cualquier punto se compone de tres términos sumables:

1. Energía de presión: P / γ (Altura de presión).
2. Energía cinética: $v^2 / 2g$ (Altura de velocidad).
3. Energía potencial: z (Cota topográfica).

$$P_1/\gamma + z_1 + v_1^2/2g = P_2/\gamma + z_2 + v_2^2/2g = \text{Constante}$$

3.3. Línea de Energía y Línea Piezométrica

Para visualizar gráficamente la energía de una red:

- **Línea de Energía (LE):** Representa la suma de las tres alturas ($z + P/\gamma + v^2/2g$). En fluidos reales, desciende por las pérdidas de carga.
- **Línea Piezométrica (LP):** Representa solo la suma topográfica y de presión ($z + P/\gamma$). Se sitúa siempre por debajo de la LE.

3.4. Teorema de Torricelli

Estudia la velocidad con la que fluye un líquido a través de un orificio en la pared de un depósito abierto a la atmósfera. Es una simplificación de Bernoulli donde la velocidad superficial se asume cero y las presiones son atmosféricas.

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Problema Resuelto 4: Efecto Venturi (Bernoulli)

Enunciado: Por una tubería horizontal circula agua. En la sección 1, la presión es de 200.000 Pa y la velocidad es de 2 m/s. En la sección 2, la tubería se estrecha y la velocidad sube a 5 m/s.

Sabiendo que $\gamma = 9810 \text{ N/m}^3$, calcula la presión en la sección 2 (sin pérdidas).

Solución:

Tubería horizontal $\Rightarrow z_1 = z_2$.

$$P_1/\gamma + v_1^2/2g = P_2/\gamma + v_2^2/2g$$

$$\text{Energía cinética 1: } 2^2 / (2 \cdot 9,81) = 0,204 \text{ m}$$

$$\text{Energía cinética 2: } 5^2 / (2 \cdot 9,81) = 1,274 \text{ m}$$

$$(200.000 / 9810) + 0,204 = P_2/9810 + 1,274$$

$$20,387 + 0,204 = P_2/9810 + 1,274$$

$$19,317 = P_2/9810 \Rightarrow P_2 = 189.499 \text{ Pa (Efecto Venturi).}$$

4. Pérdidas de Carga y Fenómenos Especiales

4.1. Pérdidas de Carga en Conducciones (Rozamiento)

El fluido real roza contra las paredes de la tubería, disipando energía en forma de calor. Esta caída de presión se denomina **pérdida de carga continua (h_f)**. Depende de la longitud (L), el diámetro (D), la velocidad (v) y la rugosidad del material. Ecuaciones como la de Darcy-Weisbach o Hazen-Williams se emplean para su cálculo.

4.2. Pérdidas Localizadas (Elementos y Accesorios)

La energía también se pierde cuando el agua encuentra obstáculos o cambios de geometría: codos, té, válvulas, ensanchamientos, embocaduras. Estas pérdidas se expresan mediante un coeficiente **K**:

$$h_L = K \cdot (v^2 / 2g)$$

4.3. El Golpe de Ariete

Es un fenómeno transitorio y violento originado por la detención brusca del fluido (ej. cierre rápido de una válvula o parada de bomba). La energía cinética se convierte en una onda de sobrepresión que viaja por la tubería, pudiendo causar su rotura. Se previene usando válvulas de cierre lento, ventosas o calderines antiarriete.

4.4. El Resalto Hidráulico

Ocurre en lámina libre (canales) cuando un flujo supercrítico (rápido y somero) transita bruscamente a subcrítico (lento y profundo). Genera una fuerte turbulencia que es muy útil en ingeniería para disipar grandes cantidades de energía (ej. cuencos amortiguadores en presas).

5. Ejercicios Propuestos

5.1. Bloque 1: Hidrostática y Caudales

1. Un depósito rectangular de agua tiene una base de 4x4 metros y una profundidad de 3 metros. Calcula la presión hidrostática en el fondo en Pascales y en m.c.a.
2. Para el depósito del ejercicio anterior, calcula la fuerza de empuje total (en Newtons) que soporta una de sus paredes verticales enteras. Dato: $\gamma = 9810 \text{ N/m}^3$.
3. Por una tubería de 150 mm de diámetro interior circula un caudal de $0,025 \text{ m}^3/\text{s}$. ¿A qué velocidad transita el agua?
4. Se desea llenar un camión cisterna de 15.000 litros en 15 minutos exactos. Calcula el caudal que debe suministrar la manguera en litros por segundo.
5. ¿Qué diámetro interior (en mm) necesita una tubería para transportar 30 litros/segundo si queremos que la velocidad del agua sea exactamente $1,2 \text{ m/s}$?

5.2. Bloque 2: Teoremas y Fenómenos Hidráulicos

1. El agua se encuentra a una cota de 15 m y tiene una presión de 180.000 Pa. Si su velocidad es de $2,5 \text{ m/s}$, calcula la altura total (Línea de Energía).
2. Un depósito abierto tiene un nivel de agua de 4,5 metros. Usando el teorema de Torricelli, calcula la velocidad inicial de salida del agua por una fisura en el fondo.
3. Si en una conducción horizontal la tubería se ensancha (pasa a tener mayor diámetro), ¿qué le ocurre a la velocidad del fluido y qué le ocurre a la presión según Bernoulli?
4. Cita tres elementos de una red de tuberías que generen pérdidas de carga "localizadas".
5. Calcula la pérdida de carga localizada que produce un codo de 90° cuyo coeficiente $K = 0,75$ si el agua circula a una velocidad de 3 m/s .
6. Explica brevemente por qué el cierre brusco de una llave en una vivienda produce un ruido seco en las tuberías y cómo se llama este efecto a gran escala en conducciones.

6. Solucionario

6.1. Soluciones al Bloque 1

- **Solución 1:** $P = \gamma \cdot h = 9810 \cdot 3 = 29.430 \text{ Pa}$. En m.c.a., la presión equivale exactamente a la altura en metros de agua, por tanto, $P = 3 \text{ m.c.a.}$
- **Solución 2:** Área de la pared $A = b \cdot h = 4 \cdot 3 = 12 \text{ m}^2$. Presión media $= \gamma \cdot h / 2 = 9810 \cdot 3 / 2 = 14.715 \text{ Pa}$. Fuerza $F = P_{\text{med}} \cdot A = 14.715 \cdot 12 = 176.580 \text{ N}$ (176,58 kN).
- **Solución 3:** $D = 0,15 \text{ m}$. Área $A = (\pi \cdot 0,15^2) / 4 = 0,01767 \text{ m}^2$. Velocidad $v = Q / A = 0,025 / 0,01767 = 1,41 \text{ m/s}$.
- **Solución 4:** Volumen = 15.000 L. Tiempo = 15 min = 900 s. Caudal $Q = 15000 / 900 = 16,67 \text{ l/s}$.
- **Solución 5:** $Q = 0,030 \text{ m}^3/\text{s}$. Área requerida $A = Q / v = 0,030 / 1,2 = 0,025 \text{ m}^2$. $D = \sqrt{(4A/\pi)} = \sqrt{(4 \cdot 0,025 / 3,1416)} = 0,178 \text{ m} = 178 \text{ mm}$.

6.2. Soluciones al Bloque 2

- **Solución 6:** $LE = z + P/\gamma + v^2/2g = 15 + (180000/9810) + (2,5^2 / (2 \cdot 9,81)) = 15 + 18,35 + 0,318 = 33,67 \text{ metros}$.
- **Solución 7:** $v = \sqrt{(2 \cdot g \cdot h)} = \sqrt{(2 \cdot 9,81 \cdot 4,5)} = \sqrt{(88,29)} = 9,39 \text{ m/s}$.
- **Solución 8:** Al aumentar el diámetro, el área aumenta, por lo que la velocidad disminuye (continuidad). Al disminuir la velocidad (cae la energía cinética), la presión aumenta para mantener la energía constante (Bernoulli).
- **Solución 9:** Válvulas, codos, y cambios bruscos de sección (reducciones o ensanchamientos).
- **Solución 10:** $h_L = K \cdot (v^2/2g) = 0,75 \cdot (3^2 / 19,62) = 0,75 \cdot 0,458 = 0,34 \text{ metros de columna de agua}$.
- **Solución 11:** El ruido es la onda de choque generada al frenar en seco la masa de agua en movimiento, transformando la energía cinética en energía de presión. A gran escala, este peligroso fenómeno se denomina **Golpe de Ariete**.