

FP QUÍMICA  
G.S. QUÍMICA INDUSTRIAL

# TRANSPORTE DE SÓLIDOS Y FLUIDOS

Eva Ródenas Torralba

Segunda edición

EDITORIAL  
SINTESIS

# T **ransporte de sólidos y fluidos**

Eva Ródenas Torralba

(segunda edición)



© Eva Ródenas Torralba

© EDITORIAL SÍNTESIS, S. A.  
Vallehermoso, 34. 28015 Madrid  
Teléfono 91 593 20 98  
[www.sintesis.com](http://www.sintesis.com)

ISBN: 978-84-1357-489-9  
Depósito Legal: M-10.743-2026

Impreso en España - Printed in Spain

Reservados todos los derechos. Está prohibido, bajo las sanciones penales y el resarcimiento civil previstos en las leyes, reproducir, registrar o transmitir esta publicación, íntegra o parcialmente, por cualquier sistema de recuperación y por cualquier medio, sea mecánico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia o por cualquier otro, sin la autorización previa por escrito de Editorial Síntesis, S. A.

# ÍNDICE

## PARTE I CONTROL DEL TRANSPORTE DE LÍQUIDOS

<b>1. Fluidos</b>	<b>RA1</b>
Resultado de aprendizaje y criterios de evaluación .....	10
Objetivos de Desarrollo Sostenible .....	10
Mapa conceptual .....	11
Glosario .....	12
Punto de partida .....	12
1.1. Introducción .....	13
1.2. Estados de agregación de la materia .....	13
1.2.1. Cambios de estado .....	15
1.3. Fluidos .....	16
1.3.1. Unidades de medida .....	16
1.3.2. Densidad y peso específico .....	21
1.3.3. Presión .....	25
1.3.4. Viscosidad .....	29
Ideas clave .....	43
Aplica lo aprendido .....	44
Solución del punto de partida .....	45
Práctica profesional 1.1 .....	46
Práctica profesional 1.2 .....	48
Práctica profesional 1.3 .....	50
Práctica profesional 1.4 .....	54
Ponte a prueba .....	56
<b>2. Estática de fluidos</b>	<b>RA1</b>
Resultado de aprendizaje y criterios de evaluación .....	58
Objetivos de Desarrollo Sostenible .....	58
Mapa conceptual .....	59

Glosario .....	60
Punto de partida .....	60
2.1. Introducción .....	61
2.2. Ecuación fundamental de la hidrostática .....	61
2.3. Instrumentos de medida de presiones .....	65
2.3.1. Manómetros .....	66
2.3.2. Barómetros .....	70
2.3.3. Transductores .....	73
2.4. Principio de Arquímedes .....	75
2.4.1. Flotación .....	76
Ideas clave .....	80
Aplica lo aprendido .....	81
Solución del punto de partida .....	83
Práctica profesional .....	84
Ponte a prueba .....	86

### 3. Introducción a la dinámica de fluidos

RA1

Resultado de aprendizaje y criterios de evaluación .....	88
Objetivos de Desarrollo Sostenible .....	88
Mapa conceptual .....	89
Glosario .....	90
Punto de partida .....	90
3.1. Flujo de fluidos .....	91
3.1.1. Caudal .....	92
3.2. Ecuación de continuidad .....	93
3.3. Conservación de la energía. Ecuación de Bernoulli .....	96
3.4. Aplicaciones de la ecuación de Bernoulli .....	102
3.4.1. Ecuación de Torricelli .....	104
3.4.2. Efecto Venturi .....	105
3.4.3. Instrumentos de medida del caudal .....	106
Ideas clave .....	115
Aplica lo aprendido .....	116
Solución del punto de partida .....	119
Práctica profesional .....	120
Ponte a prueba .....	122

### 4. Flujo de fluidos

RA1

Resultado de aprendizaje y criterios de evaluación .....	124
Objetivos de Desarrollo Sostenible .....	124
Mapa conceptual .....	125
Glosario .....	126
Punto de partida .....	126
4.1. Flujo laminar y turbulento. Número de Reynolds .....	128

4.2. Ecuación de Bernoulli generalizada .....	132
4.3. Pérdidas de energía por fricción. Ecuación de Darcy .....	136
4.3.1. Pérdida de carga en régimen laminar .....	137
4.3.2. Pérdida de carga en régimen turbulento .....	139
4.4. Pérdidas de carga secundarias .....	146
4.4.1. Método de las longitudes equivalentes .....	146
4.4.2. Método del coeficiente de resistencia .....	146
Ideas clave .....	156
Aplica lo aprendido .....	157
Solución del punto de partida .....	160
Práctica profesional .....	162
Ponte a prueba .....	164

## 5. Elementos de impulsión. Bombas RA1

Resultado de aprendizaje y criterios de evaluación .....	166
Objetivos de Desarrollo Sostenible .....	166
Mapa conceptual .....	167
Glosario .....	168
Punto de partida .....	168
5.1. Tipos de bombas. Características .....	169
5.2. Bombas centrífugas .....	179
5.2.1. Cebado de la bomba .....	181
5.2.2. Curvas características .....	181
5.2.3. Asociación de bombas centrífugas .....	186
5.2.4. Selección de un modelo de bomba .....	189
Ideas clave .....	192
Aplica lo aprendido .....	193
Solución del punto de partida .....	195
Práctica profesional .....	196
Ponte a prueba .....	198

## 6. Elementos de transporte RA1

Resultado de aprendizaje y criterios de evaluación .....	200
Objetivos de Desarrollo Sostenible .....	200
Mapa conceptual .....	201
Glosario .....	202
Punto de partida .....	202
6.1. Introducción .....	203
6.2. Tuberías y accesorios .....	203
6.2.1. Dimensiones .....	203
6.2.2. Procesos de fabricación .....	205
6.2.3. Materiales .....	205
6.2.4. Presión y diámetro nominales .....	207

6.2.5. Colores de las tuberías .....	207
6.2.6. Calorifugado y traceado .....	208
6.2.7. Accesorios .....	212
6.2.8. Soportes y juntas de expansión .....	212
6.2.9. Unión entre tuberías .....	213
<b>6.3. Válvulas .....</b>	<b>214</b>
6.3.1. Elementos comunes de las válvulas .....	214
6.3.2. Clasificación de las válvulas .....	216
6.3.3. Mantenimiento de las válvulas .....	228
<b>6.4. Filtros .....</b>	<b>229</b>
6.4.1. Tipos de filtros .....	229
<b>6.5. Simbología .....</b>	<b>231</b>
Ideas clave .....	234
Aplica lo aprendido .....	235
Solución del punto de partida .....	236
Práctica profesional .....	237
Ponte a prueba .....	239

## PARTE II

### CONTROL DEL TRANSPORTE DE GASES

<b>7. Gases industriales</b>	<b>RA2</b>
Resultado de aprendizaje y criterios de evaluación .....	242
Objetivos de Desarrollo Sostenible .....	242
Mapa conceptual .....	243
Glosario .....	244
Punto de partida .....	244
<b>7.1. Gases ideales o perfectos .....</b>	<b>245</b>
<b>7.2. Gases reales .....</b>	<b>248</b>
7.2.1. Método de la ecuación del factor de compresibilidad .....	248
7.2.2. Método de la ecuación de Van der Waals .....	254
<b>7.3. Gases industriales .....</b>	<b>256</b>
7.3.1. Clasificación de los gases industriales .....	257
7.3.2. Producción de los gases industriales .....	259
7.3.3. Aplicaciones de los gases industriales .....	260
7.3.4. Envases de los gases industriales .....	263
<b>7.4. Botellas y botellones de gases industriales .....</b>	<b>264</b>
7.4.1. Marcas e inscripciones .....	264
7.4.2. Nueva normativa referente a los colores .....	264
7.4.3. Transporte .....	266
7.4.4. Utilización .....	266
<b>7.5. Flujo de gases a través de tuberías .....</b>	<b>268</b>
7.5.1. Ecuaciones de diseño para fluidos compresibles .....	268
Ideas clave .....	273

Aplica lo aprendido .....	274
Solución del punto de partida .....	275
Práctica profesional .....	276
Ponte a prueba .....	278

## 8. Elementos de impulsión de gases

RA2

Resultado de aprendizaje y criterios de evaluación .....	280
Objetivos de Desarrollo Sostenible .....	280
Mapa conceptual .....	281
Glosario .....	282
Punto de partida .....	282
8.1. Introducción .....	283
8.2. Compresión .....	283
8.2.1. Relación de compresión .....	284
8.2.2. Tipos de compresión .....	287
8.2.3. Trabajo y potencia de compresión .....	289
8.3. Tipos de compresores .....	292
8.4. Compresores alternativos .....	293
8.5. Compresores rotativos .....	296
8.6. Compresores dinámicos centrífugos .....	299
8.7. Eyectores .....	305
8.8. Ventiladores y sopladores .....	306
8.9. Tendencias futuras y sostenibilidad en la compresión de gases .....	308
Ideas clave .....	311
Aplica lo aprendido .....	312
Solución del punto de partida .....	313
Práctica profesional .....	314
Ponte a prueba .....	315

### PARTE III

## CONTROL DEL TRANSPORTE DE SÓLIDOS

## 9. Transporte de sólidos

RA3

Resultado de aprendizaje y criterios de evaluación .....	318
Objetivos de Desarrollo Sostenible .....	318
Mapa conceptual .....	319
Glosario .....	320
Punto de partida .....	320
9.1. Introducción .....	321
9.2. Propiedades características de los sólidos .....	322
9.2.1. Fluidéz .....	322
9.2.2. Velocidad de flujo .....	322

9.2.3. Ángulo de reposo .....	323
9.2.4. Densidad aparente y densidad de empacado .....	323
9.2.5. Compresibilidad .....	325
9.2.6. Índice de Hausner .....	326
9.2.7. Abrasividad .....	326
9.2.8. Humedad .....	327
9.2.9. Tamaño de las partículas .....	328
9.3. Equipos de almacenamiento .....	331
9.4. Equipos de transporte de sólidos .....	333
9.4.1. Transporte mecánico .....	334
9.4.2. Transporte neumático .....	342
9.4.3. Transporte hidráulico .....	348
Ideas clave .....	351
Aplica lo aprendido .....	352
Solución del punto de partida .....	355
Práctica profesional .....	356
Ponte a prueba .....	359

#### PARTE IV

### ORGANIZACIÓN DE LAS OPERACIONES DE TRANSPORTE

## 10. Organización de las operaciones de transporte

**RA4**

Resultado de aprendizaje y criterios de evaluación .....	362
Objetivos de Desarrollo Sostenible .....	362
Mapa conceptual .....	363
Glosario .....	364
Punto de partida .....	364
10.1. Organización del transporte en la industria química .....	365
10.2. Principios de operación para la puesta en marcha y parada de las instalaciones de transporte .....	367
10.2.1. Puesta en marcha .....	367
10.2.2. Parada .....	368
10.2.3. Selector del modo de marcha .....	369
10.3. Supervisión del mantenimiento básico en las instalaciones de transporte de materiales ....	370
10.3.1. Vida útil de las instalaciones. Tiempo de servicio .....	372
10.4. Seguridad y protección ambiental en las operaciones de sólidos y fluidos .....	374
10.4.1. Medidas de seguridad contra elementos mecánicos .....	375
10.4.2. Medidas de seguridad contra otros peligros .....	376
10.4.3. Indicaciones de seguridad .....	378
Ideas clave .....	382
Aplica lo aprendido .....	383
Solución del punto de partida .....	384
Práctica profesional .....	387
Ponte a prueba .....	389

# 2

# Estática de fluidos

## RESULTADO DE APRENDIZAJE Y CRITERIOS DE EVALUACIÓN

**RA 1.** Controla el transporte de líquidos analizando las características de la instalación y del líquido que se tiene que transportar.

*d)* Efectúa los cálculos numéricos de fluidostática y fluidodinámica.



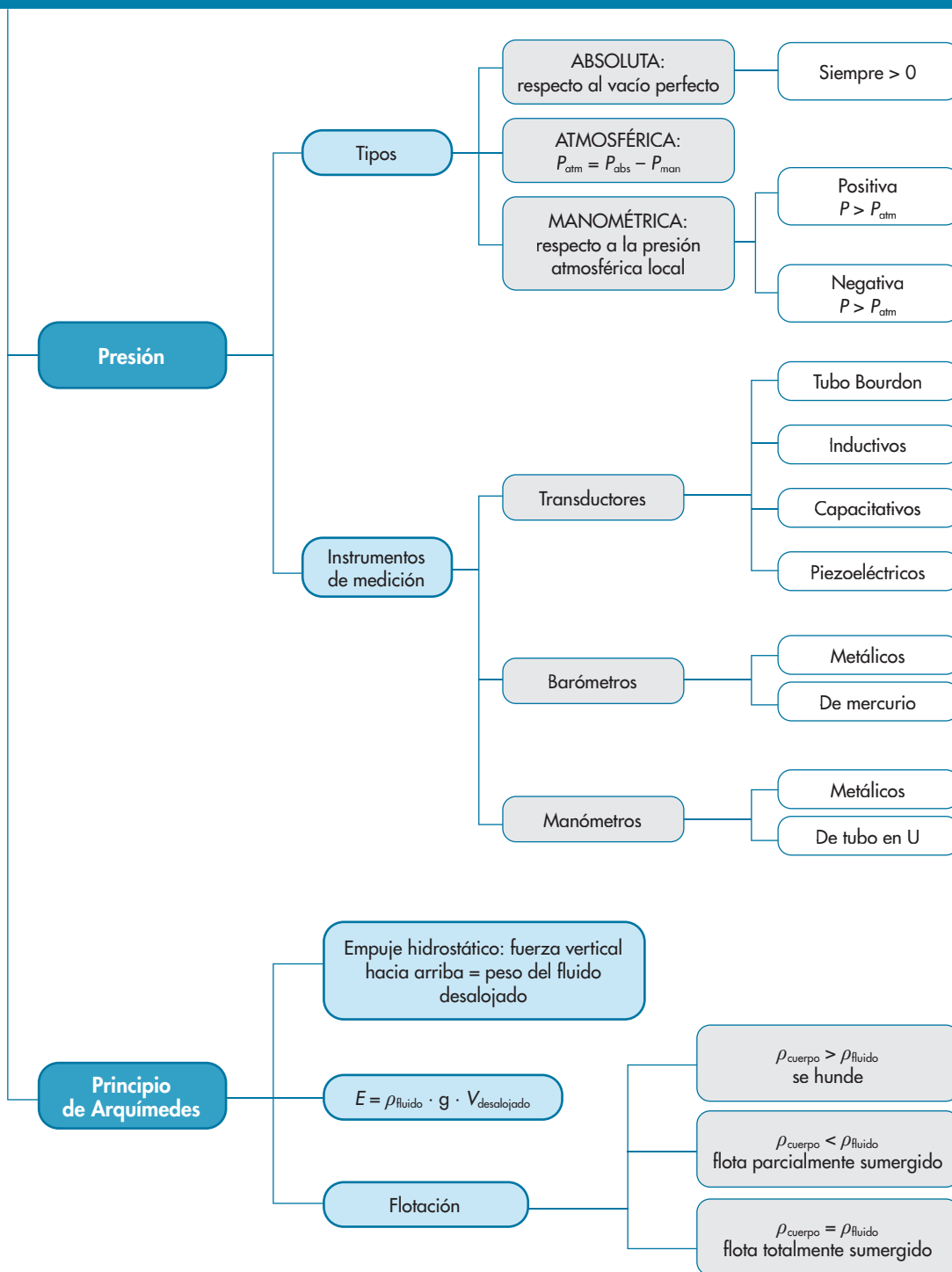
## Objetivos de Desarrollo Sostenible

En este capítulo se van a trabajar los ODS 6, 9 y 13.



## MAPA CONCEPTUAL

## ESTÁTICA DE FLUIDOS





## GLOSARIO

**Barómetro.** Instrumento utilizado para medir la presión atmosférica. Puede ser de mercurio (como el de Torricelli) o aneroide (metálico).

**Centro de flotación (o de carena).** Punto en el que se considera aplicada la fuerza de empuje hidrostático; coincide con el centro de gravedad del volumen de fluido desalojado, que es el mismo que el centro de gravedad de la parte sumergida del cuerpo.

**Ecuación fundamental de la hidrostática.** Relación que establece que la diferencia de presión entre dos puntos de un fluido en reposo es igual al producto de la densidad del fluido, la gravedad y la diferencia de altura.

**Empuje hidrostático.** Fuerza vertical hacia arriba que experimenta un cuerpo sumergido total o parcialmente en un fluido, igual al peso del volumen de fluido desalojado (principio de Arquímedes).

**Estática de fluidos.** Rama de la mecánica de fluidos que estudia los fluidos en reposo. Si el fluido es un líquido, se denomina hidrostática; si es un gas, aerostática.

**Flotabilidad.** Capacidad de un cuerpo para flotar en un fluido, determinada por la relación entre su densidad y la del fluido.

**Manómetro.** Instrumento para medir diferencias de presión, generalmente mediante columnas de líquido (tubo en U) o mediante elementos elásticos (Bourdon).

**Tubo Bourdon.** Elemento sensor en forma de tubo curvado utilizado en manómetros metálicos, que se deforma con la presión y mueve una aguja indicadora.



## PUNTO DE PARTIDA

En una planta química se debe diseñar un sistema de almacenamiento y control para ácido sulfúrico al 98 % ( $\rho = 1,84 \text{ g/cm}^3$ ). El tanque cilíndrico vertical tiene las siguientes características:

- Diámetro interno: 2,5 m
- Altura total: 4 m
- Nivel máximo de operación: 3,5 m

Responde a las siguientes cuestiones:

1. Presión de diseño: calcula la presión hidrostática en el fondo del tanque cuando está lleno al 100 % de su capacidad de operación.
2. Instrumentación: selecciona el tipo de instrumento más adecuado para medir el nivel del tanque entre estas opciones. Justifica la elección técnicamente.
  - a) Manómetro diferencial.
  - b) Transductor de presión.
  - c) Barómetro.
  - d) Medidor de caudal.

3. Principio de Arquímedes: se introduce un sensor de calidad con forma esférica (diámetro 15 cm, masa 2,1 kg) en el tanque. ¿Flotará o se hundirá? Demuéstralo calculando el empuje.
4. Seguridad y normativa:
  - ¿Qué dispositivos de seguridad son críticos en este tanque considerando la alta densidad y corrosividad del ácido sulfúrico?
  - Calcula la fuerza neta que soportaría una brida de 8" ubicada a 1 m de altura si falla la estanqueidad.

## 2.1. Introducción

La *estática de fluidos* trata de los problemas relacionados con los fluidos en reposo. El fluido puede ser gaseoso o líquido. En general, la estática de fluidos se llama *hidrostática* cuando el fluido es un líquido y *aerostática* cuando el fluido es un gas.

En la estática de fluidos no se tiene movimiento relativo entre capas adyacentes del fluido y el único parámetro que se estudia es la presión y su variación únicamente con el peso del fluido.

El objetivo de este capítulo es, por tanto, conocer la ecuación fundamental de la hidrostática, que relaciona la presión con la altura y el peso específico y los instrumentos de medida de presión, como manómetros o barómetros. Además, la hidrostática también se aplica a cuerpos flotantes o sumergidos, por lo que en el capítulo se estudiarán los conceptos básicos de la flotación.

## 2.2. Ecuación fundamental de la hidrostática

La hidrostática es la parte de la hidráulica que estudia el equilibrio de los líquidos en estado de reposo.

La ecuación fundamental de la hidrostática indica que la diferencia de presiones entre dos puntos pertenecientes a un mismo líquido en equilibrio es igual al peso específico del líquido por la diferencia de altura.

Todos los líquidos pesan; por ello, cuando están contenidos en un recipiente, las capas superiores oprimen a las inferiores, generándose una presión debida al peso. La presión en un punto determinado del líquido depende entonces de la altura de la columna de líquido que tenga por encima.

Considérese un punto cualquiera del líquido que diste una altura  $h$  de la superficie libre de dicho líquido. La fuerza del peso debido a una columna cilíndrica de líquido de base  $A$  situada sobre él puede expresarse de la forma:

$$F = m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g = \rho \cdot g \cdot h \cdot A \quad AF = m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g = \rho \cdot g \cdot h \cdot A$$

Siendo  $V$  el volumen de la columna y  $\rho$  la densidad del líquido. Por tanto, la presión debida al peso vendrá dada por:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot A}{A} = \rho \cdot g \cdot h$$

Si sobre la superficie libre se ejerciera una presión exterior adicional  $P_0$ , como la atmosférica, por ejemplo, la presión total  $P$  en el punto de altura  $h$  sería:

$$P = P_0 + \rho \cdot g \cdot h \rightarrow \Delta P = \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad P = P_0 + \rho \cdot g \cdot h \rightarrow \Delta P = \rho \cdot g \cdot h$$

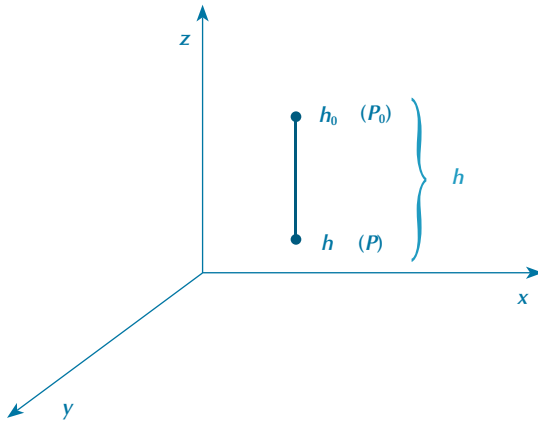
$$P = P_0 + \gamma \cdot h \rightarrow \Delta P = \gamma \cdot \Delta h \quad P = P_0 + \gamma \cdot h \rightarrow \Delta P = \gamma \cdot h$$

Esta ecuación puede generalizarse al caso de que se trate de calcular la diferencia de presiones  $\Delta P$  entre dos puntos cualesquiera del interior del líquido situados a diferentes alturas, resultando:

$$P_2 - P_1 = \rho \cdot g \cdot (h_1 - h_2)$$

$$P_2 - P_1 = \gamma \cdot (h_1 - h_2)$$

que constituye la llamada *ecuación fundamental de la hidrostática* y demuestra que la presión de un fluido aumenta linealmente con la profundidad (figura 2.1).



**Figura 2.1.** Esquema de la ecuación fundamental de la hidrostática.

La ecuación anterior también puede expresarse como:

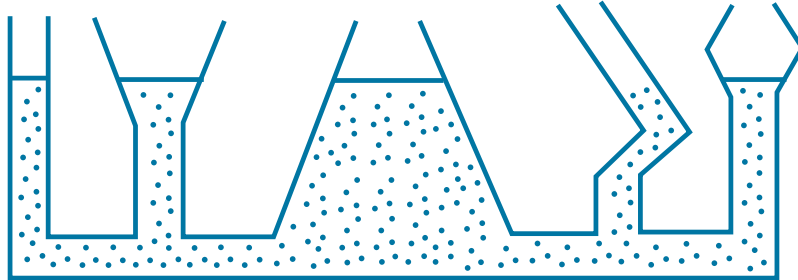
$$\frac{P - P_0}{-\gamma} = h - h_0 \longrightarrow -\frac{P}{\gamma} + \frac{P_0}{\gamma} = h - h_0$$

$$h_0 + \frac{P_0}{\gamma} = h + \frac{P}{\gamma} = cte \longrightarrow \text{Altura piezométrica}$$

Esta última ecuación indica que en un líquido incompresible es constante la suma de la altura geométrica o de posición y de la presión unitaria dividida por el peso específico. El cociente  $(P/\gamma) = h$  se denomina *altura de presión* y representa la altura  $h$  de la columna de líquido de peso específico  $\gamma$  capaz de producir la presión  $P$ .

Resumiendo, la ecuación fundamental de la hidrostática indica que, para un fluido dado y para una presión exterior constante, la presión en el interior depende únicamente de la altura, tal y como se esquematiza en la figura 2.2. Por tanto, todos los puntos del fluido que se encuentren

al mismo nivel soportan igual presión. Ello implica que ni la forma de un recipiente ni la cantidad de fluido que contiene influyen en la presión que se ejerce sobre su fondo, únicamente la altura de fluido y el tipo de fluido. Esto es lo que se conoce como *paradoja hidrostática o de Pascal*, cuya explicación se deduce a modo de consecuencia de la ecuación fundamental de la hidrostática.



**Figura 2.2.** Paradoja hidrostática o de Pascal.



### SABÍAS QUE...

Una presa se diseña más gruesa en la base porque la presión del agua aumenta con la profundidad: cuanto más abajo, mayor es la altura de columna de agua y, por tanto, mayor es la presión que empuja el muro hacia aguas abajo. En la parte superior, la presión es pequeña y basta poco espesor para resistirla, pero en el fondo la presión es máxima y el muro debe tener suficiente “peso propio” y sección para que la resultante de fuerzas (peso de la presa y empuje del agua) quede dentro de la base y la estructura no vuelque ni se deslice.



### ACTIVIDAD RESUELTA 2.1

En una planta química, se tienen dos tanques de diferente forma, pero misma altura, uno cilíndrico y otro cónico, ambos llenos de agua hasta la misma altura. ¿La presión en el fondo de ambos tanques será la misma? Justifica tu respuesta aplicando la ecuación fundamental de la hidrostática.

SOLUCIÓN:

Sí, la presión en el fondo será la misma en ambos tanques porque la presión hidrostática depende únicamente de la altura de la columna de fluido y de su densidad, no de la forma del recipiente (paradoja de Pascal). Esto es cierto siempre que los tanques contengan el mismo fluido y estén abiertos a la misma presión atmosférica.



## TOMA NOTA

Imagina dos recipientes del mismo tamaño: uno lleno de salmuera muy concentrada y otro lleno de etanol, ambos hasta la misma altura. La presión en el fondo no será la misma, sino mayor en el recipiente que contiene la salmuera, porque su densidad es claramente superior a la del etanol, y en la expresión de la presión hidrostática  $P = \rho \cdot g \cdot h$  la densidad multiplica directamente a la altura.

Ahora bien, dentro de cada uno de esos líquidos, todos los puntos situados a una misma profundidad tienen exactamente la misma presión. Si en una misma superficie horizontal hubiera zonas con distinta presión, el fluido fluiría de las regiones de menor presión hacia las de mayor presión hasta igualarla, de modo que no podría mantenerse el estado de equilibrio estático.



## CASO PRÁCTICO RESUELTO 2.1

Un depósito de agua potable está sellado y presurizado (fig. 2.3). En la parte superior, una válvula de control mantiene una presión constante de 1 atm en la cámara de aire. Durante una inspección técnica, se mide la presión a 50 cm por debajo de la superficie del agua, obteniendo un valor de 2 atm. Se requiere determinar la presión que debe medirse a 1,5 m de profundidad para verificar el correcto funcionamiento del sistema de monitorización.

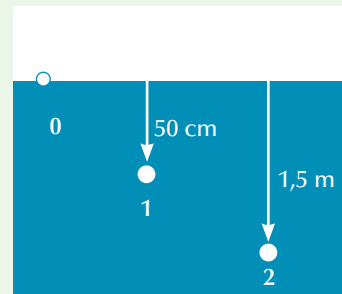


Figura 2.3. Esquema del ejercicio.

SOLUCIÓN:

Utilizando la ecuación fundamental de la hidrostática entre los puntos 0 y 1:

$$P_2 = P_0 + 3 \text{ atm} = 1 \text{ atm} + 3 \text{ atm} = 4 \text{ atm}$$

Aplicando la misma ecuación entre los puntos 0 y 2, y sabiendo que  $3 \cdot h_1 = h_2$ :

$$P_1 - P_0 = \rho \cdot g \cdot h_1 = 2 \text{ atm} - 1 \text{ atm} = 1 \text{ atm}$$

Y como  $P_0 = 1 \text{ atm}$ :

$$P_2 - P_0 = \rho \cdot g \cdot h_2 = \rho \cdot g \cdot 3h_1 = 3 \cdot (\rho \cdot g \cdot h_1) = 3 \cdot 1 \text{ atm} = 3 \text{ atm}$$

$$P_2 = P_0 + 3 \text{ atm} = 4 \text{ atm}$$

## 2.3. Instrumentos de medida de presiones

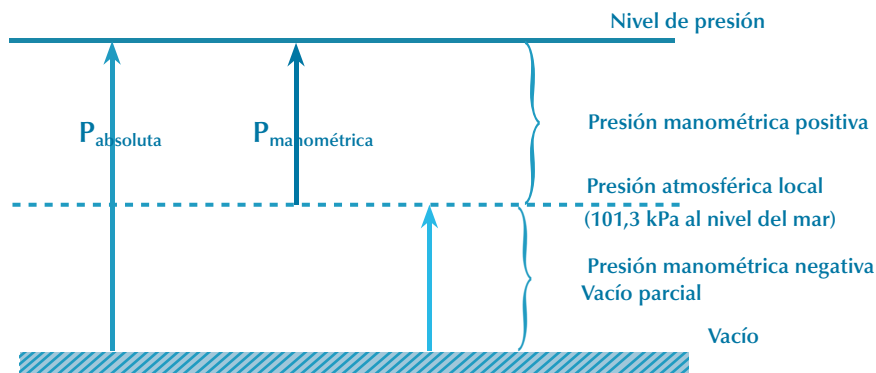
Previamente a estudiar los diferentes instrumentos para la medida de la presión es importante recordar las formas de medir la presión:

1. Refiriéndola a un nivel de presión nula (cero absoluto o vacío perfecto). En este caso se denomina *presión absoluta*.
2. Usando la presión atmosférica local como referencia. Esta forma se emplea en muchos instrumentos de medida de tipo diferencial y la presión que se obtiene con la medición se denomina, en términos generales, *presión manométrica*. Sin embargo, dependiendo de que la presión sea superior o inferior a la atmosférica, se suele denominar de la siguiente forma:
  - Presión manométrica, si  $P > P_{atm}$ .
  - Presión de vacío, si  $P < P_{atm}$ .

Una ecuación sencilla que relaciona los dos sistemas de medición de la presión es la siguiente:

$$P_{abs} = P_{manom} + P_{atm}$$

La siguiente figura 2.4 interpreta gráficamente esta ecuación:



**Figura 2.4.**  
Sistemas de  
medición  
de la presión.

La presión atmosférica es la presión que ejerce la atmósfera de la Tierra (la presión del aire). El valor real de la presión atmosférica depende de la localización, la temperatura y las condiciones climáticas.

La primera comprobación experimental de la existencia de una presión asociada al aire fue efectuada por Evangelista Torricelli (1608-1647). El experimento de Torricelli consistió en llenar de mercurio un tubo de vidrio de más de un metro de largo, cerrarlo provisionalmente e invertirlo sumergiéndolo en una gran cubeta con mercurio. Cuando abrió el extremo del tubo sumergido observó que este solo se vaciaba en parte, quedando en su interior una columna de mercurio de setenta y seis centímetros.

Este resultado fue interpretado como una prueba de que la presión del peso del aire actuando sobre la superficie libre del mercurio de la cubeta era capaz de soportar el peso de la

columna. En el espacio restante del tubo se produjo el primer vacío de la historia de la física, que se conoce como *vacío de Torricelli*. La presión correspondiente a una columna de mercurio de 760 mm de altura define, precisamente, la atmósfera (atm) como unidad de presión.

La presión atmosférica no varía únicamente con la altura, también lo hace con la temperatura y la humedad.



### SABÍAS QUE...

Las variaciones en la presión atmosférica, que Torricelli fue el primero en observar con su tubo invertido, no solo sentaron las bases para los barómetros modernos, sino que también revelan su utilidad práctica en campos como la meteorología y la aviación. En meteorología, las caídas rápidas de presión indican la aproximación de frentes cálidos o tormentas, mientras que aumentos señalan tiempo estable, permitiendo pronósticos precisos que salvan vidas y optimizan la agricultura. En aviación, los altímetros de los aviones convierten estas variaciones en datos de altitud asumiendo una presión estándar al nivel del mar (1 013 hPa), ajustándose manualmente por pilotos para compensar cambios locales y evitar errores que podrían ser fatales durante despegues o aterrizajes.

### 2.3.1. Manómetros

De la ecuación fundamental de la hidrostática,  $\Delta P = \rho \cdot g \cdot \Delta h$ , se deduce que una variación de alturas en un fluido es equivalente a una diferencia de presiones.

Por tanto, para medir diferencias de presión entre dos puntos se pueden utilizar columnas estáticas de uno o más líquidos o gases. Los instrumentos de este tipo se denominan *manómetros*.

Un manómetro es un instrumento que sirve para medir la relación que existe entre un cambio de presión y un cambio de elevación en un fluido estático. Existen básicamente dos tipos de manómetros: los metálicos y los de tubo en U.



### ACTIVIDAD RESUELTA 2.2

En un tanque de almacenamiento de ácido nítrico, se instala un manómetro diferencial para medir el nivel del líquido. Si el manómetro deja de mostrar desnivel, ¿qué posibles fallos podrían haber ocurrido en el sistema y qué medidas de seguridad deberían activarse?

SOLUCIÓN:

Podría deberse a una obstrucción en las líneas de conexión, fuga en el sistema, o que el tanque esté vacío. Deben activarse alarmas de nivel bajo, revisarse los sensores de presión y verificar la integridad de las tuberías para prevenir riesgos de derrame o sobrellenado.

### A) Manómetros metálicos o tipo Bourdon

En los manómetros metálicos (figura 2.5), la presión del fluido da lugar a deformaciones en una cavidad o tubo metálico. Estas deformaciones se transmiten a través de un sistema mecánico a una aguja que marca directamente la presión sobre una escala graduada.



**Figura 2.5.** Manómetro metálico de Bourdon.

### B) Manómetros de tubo en U

Los manómetros de tubo en U o diferenciales emplean, por lo general, un líquido conocido como *fluido manométrico*, que no se mezcla con el fluido cuya presión se va a determinar. Los fluidos manométricos típicos son agua, mercurio y aceites coloreados.

Un extremo del tubo con forma de U se conecta a la presión que se va a medir, mientras que el otro extremo se deja abierto a la atmósfera, normalmente. Bajo la acción de la presión que se va a determinar, el fluido manométrico es desplazado de su posición normal. Mediante la ecuación fundamental de la hidrostática se establecen expresiones para calcular la presión que se presenta a través del manómetro.

El tubo en U puede estar abierto a la atmósfera o cerrado. En ambos casos se determina el desnivel del fluido manométrico entre ambas ramas. Si el manómetro es de tubo abierto, es necesario tener en cuenta la presión atmosférica: . Si es de tubo cerrado, la presión vendrá dada directamente por:  $P = \rho \cdot g \cdot h$ .



### ACTIVIDAD RESUELTA 2.3

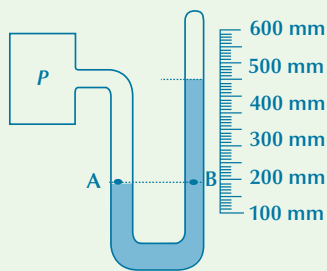
En una instalación frigorífica industrial, se necesita medir la presión de vacío en un evaporador. ¿Qué tipo de instrumento sería más adecuado: un manómetro metálico de Bourdon o un manómetro de tubo en U con mercurio? Justifica tu elección en función del rango de medida y la precisión requerida.

SOLUCIÓN:

Sería más adecuado un manómetro de tubo en U con mercurio, ya que permite medir presiones de vacío (negativas) con mayor precisión y es ideal para bajas presiones diferenciales, mientras que los manómetros de Bourdon son más adecuados para presiones positivas altas.



### ACTIVIDAD RESUELTA 2.4



Calcula la presión del mercurio en B (en mmHg y en Pa) utilizando el manómetro de tubo en U que se muestra en la figura 2.6. El líquido azul del interior del manómetro es mercurio (representado en azul en el esquema) y por encima de este hay vacío. La densidad del mercurio es  $13\,600 \text{ kg/m}^3$ .

**Figura 2.6.** Manómetro de tubo en U del ejercicio.

SOLUCIÓN:

La presión en B es la debida a la columna de Hg que hay sobre B:

$$P_B = 500 \text{ mmHg} - 200 \text{ mmHg} = 300 \text{ mmHg}$$

$$P_B = \rho \cdot g \cdot h = 13600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (0,5 - 0,2) \text{ m} = 39984 \text{ Pa}$$

Esta presión coincide con la presión del Hg en A, ya que  $P_A = P_B$ .

### C) Procedimiento de cálculo

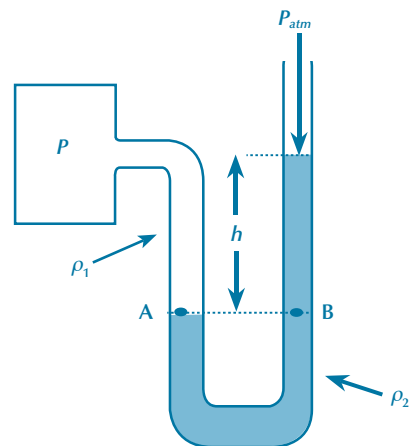
Sea un manómetro de tubo en U simple, como el mostrado en la figura 2.7, mediante el que se determinará la medida de la presión en  $P$ :

Deben realizarse los siguientes cálculos:

1. La presión en los puntos A y B es la misma ( $P_A = P_B$ ), ya que se encuentran ambos a la misma altura (mismo nivel).
2. Aplicando la ecuación fundamental de la hidrostática a los puntos A y B se obtiene:

$$P_A = P + \rho_1 \cdot g \cdot h$$

$$P_B = P_{atm} + \rho_2 \cdot g \cdot h$$



**Figura 2.7.** Manómetro simple de tubo en U.

Igualando ambas ecuaciones, ya que  $P_A = P_B$ :

$$P + \rho_1 \cdot g \cdot h = P_{atm} + \rho_2 \cdot g \cdot h$$

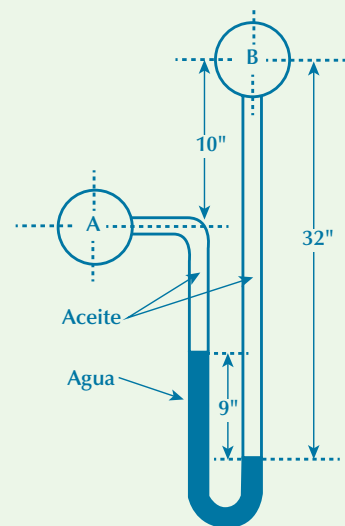
Por último, la presión manométrica en el punto  $P$  se obtiene de despejar esta incógnita:

$$P = P_{atm} + \rho_2 \cdot g \cdot h - \rho_1 \cdot g \cdot h$$



### ACTIVIDAD RESUELTA 2.5

Calcula la diferencia de presiones entre los puntos A y B ( $P_A - P_B$ ) para el manómetro diferencial de la figura 2.8, sabiendo que la densidad relativa del aceite es 0,85, la densidad relativa del agua es 1,00 y que 1 pulgada equivale a 2,54 cm.

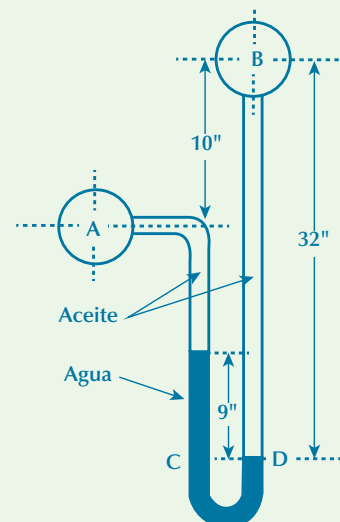


**Figura 2.8.** Manómetro de tubo en U del ejercicio.

SOLUCIÓN:

En primer lugar, se toman los puntos C y D en la base del manómetro de la figura 2.9.

La presión en los puntos C y D es la misma ( $P_C = P_D$ ), ya que se encuentran ambos a la misma altura (mismo nivel).



**Figura 2.9.** Manómetro de tubo en U del ejercicio (solución).

Aplicando la ecuación fundamental de la hidrostática a los puntos C y D se obtiene:

$$P_C = P_A + \rho_{\text{aceite}} \cdot g \cdot h_{\text{aceite},A} + \rho_{\text{agua}} \cdot g \cdot h_{\text{agua},A}$$

$$P_D = P_B + \rho_{\text{aceite}} \cdot g \cdot h_{\text{aceite},B}$$

Igualando ambas ecuaciones, ya que  $P_C = P_D$ :

$$P_A + \rho_{\text{aceite}} \cdot g \cdot h_{\text{aceite},A} + \rho_{\text{agua}} \cdot g \cdot h_{\text{agua},A} = P_B + \rho_{\text{aceite}} \cdot g \cdot h_{\text{aceite},B}$$

Por último, despejando la diferencia de presiones entre los puntos A y B ( $P_A - P_B$ ) y sustituyendo los datos del enunciado:

$$P_A - P_B = \rho_{\text{aceite}} \cdot g \cdot h_{\text{aceite},B} - \rho_{\text{aceite}} \cdot g \cdot h_{\text{aceite},A} - \rho_{\text{agua}} \cdot g \cdot h_{\text{agua},A}$$

$$P_A - P_B = 850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (0,8128 \text{ m} - 0,3302 \text{ m}) - 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,2286 \text{ m} = 1780 \text{ Pa}$$

### 2.3.2. Barómetros

El barómetro es el instrumento que se utiliza para medir la presión atmosférica. Como en el caso de los manómetros, también los hay metálicos y de mercurio.



#### SABÍAS QUE...

Durante décadas, muchos procesos industriales y laboratorios utilizaron manómetros y barómetros de mercurio como referencia estándar para medir la presión, porque eran muy precisos y relativamente sencillos de construir. Con el tiempo, la elevada toxicidad del mercurio y las normativas ambientales más estrictas llevaron a restringir y prácticamente prohibir su uso, obligando a sustituir estos instrumentos por sensores electrónicos (transductores de presión) basados en tecnologías como galgas extensiométricas, piezoelectricidad o células capacitivas. Este cambio no solo redujo el riesgo de contaminación y los costes de gestión de residuos peligrosos, sino que también transformó la práctica industrial: ahora es mucho más fácil integrar la medida de presión en sistemas de control automático, registrar datos en tiempo real y transmitir señales a largas distancias sin necesidad de leer columnas de líquido de forma manual.

### A) Barómetros metálicos o aneroides

Los barómetros metálicos o aneroides (figura 2.10) constan de una caja metálica de paredes relativamente elásticas en cuyo interior se ha efectuado el vacío. Un resorte metálico hace que las paredes de la caja estén separadas. En ausencia de este resorte las paredes tenderían a aproximarse por efecto de la presión exterior. Variaciones en la presión atmosférica producen cambios en la forma de la caja que se transmiten al resorte y este, mediante un mecanismo de amplificación, los indica sobre una escala graduada.



Figura 2.10. Barómetro aneroides.

### B) Barómetros de mercurio

Los barómetros de mercurio se basan en el dispositivo utilizado por Torricelli en sus experimentos. Consisten en un tubo largo cerrado en un extremo y que, inicialmente, está lleno completamente con mercurio. El extremo abierto se sumerge bajo la superficie de un contenedor lleno con mercurio y se deja que el sistema alcance el equilibrio. En la parte superior del tubo se produce un vacío que se encuentra muy cercano al cero perfecto.



#### SABÍAS QUE...

Evangelista Torricelli fue un matemático y físico italiano del siglo XVII. Descubrió y determinó el valor de la presión atmosférica e inventó el barómetro (figura 2.11). También comprobó que el flujo de un líquido por una abertura es proporcional a la raíz cuadrada de la altura del líquido (teorema de Torricelli). Fue experto en la construcción de telescopios y una unidad de medida, el torr, se denomina así en su honor.

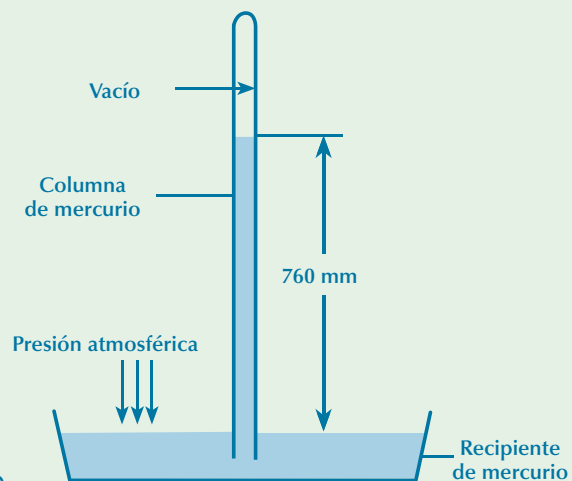


Figura 2.11. Barómetro de mercurio.

El llamado *barómetro de Fortín* (figura 2.12) es una reproducción mejorada del aparato de Torricelli. Su cubeta posee un fondo compuesto de un material flexible, por lo que puede ser alterado mediante un tornillo auxiliar con el fin de conseguir ajustar el nivel del mercurio de la cubeta al cero de la escala graduada cada vez que se efectúa una medida.



**Figura 2.12.** Barómetro de Fortín. ©RSEAPT



### ACTIVIDAD RESUELTA 2.6

En una estación de monitoreo ambiental se utiliza un barómetro aneróide para medir la presión atmosférica. Si repentinamente la aguja indica un descenso brusco, ¿qué fenómeno meteorológico podría estar aproximándose y por qué es importante esta medida en la predicción del tiempo?

SOLUCIÓN:

Un descenso brusco de la presión atmosférica suele indicar la aproximación de un frente meteorológico, posiblemente asociado a tormentas o mal tiempo. Este dato es crucial en meteorología porque la presión barométrica es un indicador clave de cambios en las condiciones atmosféricas.



Los *barómetros de sifón* (figura 2.13) son manómetros simples de tubo cerrado en los que la rama corta del tubo en U se utiliza como una cubeta y la rama larga del tubo en U como un tubo de Torricelli.

**Figura 2.13.** Barómetro de sifón.