

---

# Laboratorio de Física

## Grado en Farmacia

---

- Curso 2012-2013 -

## Índice

---

Práctica 1	Medida de densidades de sólidos.....	1
Práctica 2	Medida de densidades de líquidos.....	3
Práctica 3	Medida de viscosidades: fluido newtoniano.....	5
Práctica 4	Medida de viscosidades: fluido no newtoniano.....	7
Práctica 5	Medida de la tensión superficial con un estalagmómetro.....	9
Práctica 6	Ley de enfriamiento.....	11
Práctica 7	Medidas de sonido.....	13
Práctica 8	Medida de índices de refracción.....	16
Apéndice:	Tablas de densidades, viscosidades y tensiones superficiales.....	18

# PRÁCTICA 1. Medida de densidades de sólidos

## 1. Objetivos

Determinar la densidad, con su error, de sólidos irregulares a partir del empuje sufrido cuando se sumergen en agua. Comparar el resultado con los valores tabulados y discutir los resultados.

## 2. Introducción

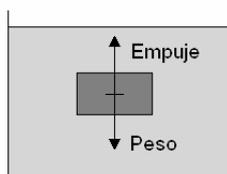
La densidad de un sólido es el cociente entre su masa ( $m_s$ ) y su volumen ( $V$ )

$$\rho = \frac{m_s}{V} \quad (1.1)$$

La masa de un sólido podemos determinarla con una balanza. Si el cuerpo es regular, midiendo sus dimensiones podemos calcular su volumen. A partir de la masa y el volumen de cuerpo, con sus imprecisiones respectivas, podremos calcular la densidad con su error. Sin embargo si el sólido no es regular, es más complicado determinar el volumen del sólido.

Para la medida de la densidad partiremos del Principio de Arquímedes: "Todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje hacia arriba igual al peso del fluido desalojado".

Cuando un sólido entra en un fluido (líquido o gas) desplaza una porción del mismo para poder entrar en él. El sólido desplaza al fluido ejerciendo una fuerza sobre él. Por el principio de acción y reacción (3ª ley de Newton), si el sólido ejerce una fuerza sobre el fluido, el fluido ejercerá sobre el sólido con una fuerza igual y de sentido contrario. La fuerza con la que el fluido empuja es el peso del fluido al que el sólido ha empujado (fluido desalojado).



Así, tendremos que el empuje será el peso del fluido desalojado

$$\text{Empuje} = \text{Peso}_f = m_f g = \rho_f V_f g, \quad (1.2)$$

donde el subíndice  $f$  se refiere a fluido desalojado por el sólido, y hemos aplicado la expresión (1.1) de la densidad.

Figura 1.1 Diagrama de fuerzas

El volumen de fluido desalojado es exactamente el volumen del sólido sumergido (cuando está totalmente sumergido)  $V_f = V_s$ , por lo que podremos escribir

$$\text{Empuje} = \rho_f V_f g = \rho_f V_s g \quad (1.3)$$

Para conocer la densidad del sólido necesitamos saber su volumen  $V_s$ . Como sabemos la densidad del fluido, mediremos la fuerza del empuje con una balanza y utilizando la ecuación (1.3) podremos conocer el volumen del sólido.

## 3. Material

- |                                      |                        |
|--------------------------------------|------------------------|
| - sólido problema (hueso o aluminio) | - balanza              |
| - soporte y polea                    | - vasos de precipitado |
| - termómetro                         | - agua                 |

## 4. Procedimiento experimental

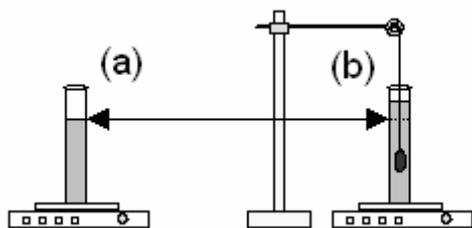


Fig. 1.2 Montaje experimental

1. Medir la masa del sólido en la balanza ( $m_s$ ).
2. Retirar el sólido. Poner un cierto volumen de agua en un recipiente sobre la balanza; medir la temperatura del agua y tarar la balanza (Fig. 1.2a)
3. Colgar el sólido problema de una polea, sumergirlo en el agua sin que toque las paredes o el fondo: el volumen de agua aumentará (Fig. 1.2b).

Tomar la medida de masa que marque la balanza con su error ( $m_f$ ). El volumen de agua aumenta porque el sólido ha desalojado parte del líquido. Por el principio de Arquímedes el cuerpo experimenta una fuerza hacia arriba: el empuje, que coincide con el peso del fluido desalojado, ecuación (1.2). Por el principio de acción y reacción, si el agua empuja al sólido hacia arriba, entonces el sólido empuja al agua hacia abajo. Esa fuerza hacia abajo es lo que detectamos con la balanza, pues el peso del cuerpo no interviene, ya que lo sustenta la polea. Como conclusión, la balanza mide la masa del fluido desalojado ( $m_f$ ).

4. Calcular la densidad del sólido.

Utilizando las ecuaciones (1.2) y (1.3)

$$m_f g = \rho_f V_f g = \rho_{agua} V_s g \quad (1.4)$$

De donde, despejando y simplificando g

$$V_s = \frac{m_f}{\rho_{agua}} \quad (1.5)$$

La densidad del agua vale 1 g/cm<sup>3</sup> a 3.98 °C. Para obtener la densidad del agua a la temperatura del laboratorio tendremos que interpolar a partir de la tabla adjunta de densidades (tabla 1 en apéndice). El error asociado a la medida del termómetro dará lugar a que determinemos la densidad con un cierto error.

A partir la masa del sólido ( $m_s$ ) con su error, la masa del fluido desalojado ( $m_f$ ) con su error; y la densidad del agua ( $\rho_{agua}$ ) con su error, podemos determinar, por sustitución, la densidad del sólido ( $\rho_s$ ) utilizando la expresión siguiente

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} = \frac{m_s}{m_f} \rho_{agua} \quad (1.6)$$

El error asociado a  $\rho_s$  lo podremos calcular con el método de los logaritmos o el de las derivadas parciales.

5. Repetir el procedimiento para tres sólidos del mismo material con el propósito de mejorar la precisión de la medida. Calcular el valor medio de las densidades  $\bar{\rho}$ , que será la densidad experimental  $\rho_{exp}$ . Para el error de la medida, utilizar el mayor entre el error medio

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon(\rho_1) + \varepsilon(\rho_2) + \varepsilon(\rho_3)}{3} \quad (1.7)$$

y el error de dispersión

$$\varepsilon_D = \frac{\rho_{max} - \rho_{min}}{4} \quad (1.8)$$

donde  $\rho_{max}$  es el valor máximo,  $\rho_{min}$  el valor mínimo.

## 5. Discusión

1. Discutir el valor obtenido de la densidad del sólido en función de la dispersión D de las tres medidas, calculada como

$$D(\%) = \frac{\rho_{max} - \rho_{min}}{\bar{\rho}} 100, \quad (1.9)$$

donde  $\bar{\rho}$  es el valor medio

2. Comparar el valor de la densidad resultante con la tabla 2 del apéndice, utilizando la desviación relativa (que indica la exactitud de la medida)

$$DR(\%) = \frac{\rho_{exp} - \rho_T}{\rho_T} 100, \quad (1.9)$$

donde  $\rho_{exp}$  es el valor experimentalmente determinado,  $\rho_T$  es el valor tabulado. Discutir a qué son debidas las posibles diferencias.

## PRÁCTICA 2. Medida de densidades de líquidos

### 1. Objetivos

Determinar la densidad de distintas disoluciones de agua y sal común utilizando el principio de Arquímedes. Relacionar matemáticamente la densidad y la concentración en sal. Hacer predicciones de concentraciones de agua y sal y verificarlas.

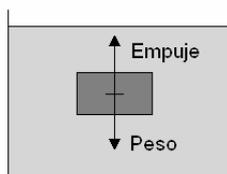
### 2. Introducción

La densidad de un líquido es el cociente entre su masa ( $m$ ) y su volumen ( $V$ )

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

La masa podemos determinarla con una balanza, y el volumen podemos determinarlo utilizando un recipiente graduado. Sin embargo, también podemos utilizar el principio de Arquímedes: "Todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje hacia arriba igual al peso del fluido desalojado".

Cuando un sólido entra en un fluido (líquido o gas) desplaza una porción del mismo para poder entrar en él. El sólido desplaza al fluido ejerciendo una fuerza sobre él. Por el principio de acción y reacción (3ª ley de Newton), si el sólido ejerce una fuerza sobre el fluido, el fluido ejercerá sobre el sólido con una fuerza igual y de sentido contrario. La fuerza con la que el fluido empuja es el peso del fluido al que el sólido ha empujado (fluido desalojado).



El empuje sobre el cuerpo es el peso del fluido desalojado

$$\text{Empuje} = \text{Peso}_f = m_f g = \rho_f V_f g, \quad (2.2)$$

donde el subíndice  $f$  se refiere a fluido desalojado por el sólido, y hemos aplicado la expresión (2.1) de la densidad.

Figura 2.1 Diagrama de fuerzas

El punto clave es que el volumen de fluido desalojado ( $V_f$ ) es exactamente el volumen del sólido sumergido ( $V_s$ ),  $V_f = V_s$ , cuando el sólido está totalmente sumergido. Así

$$\text{Empuje} = \rho_f V_f g = \rho_f V_s g \quad (2.3)$$

El empuje lo mediremos con una balanza; utilizaremos un sólido (inmersor) de volumen conocido  $V_s$ ; y la incógnita será la densidad del fluido ( $\rho_f$ ).

Utilizaremos como problema varias disoluciones de agua y sal común, teniendo en cuenta que su concentración, en tanto por cien se obtiene como

$$C(\%) = \frac{\text{masa en gramos de soluto}}{100 \text{ gramos de disolucion}} 100 \quad (2.4)$$

### 3. Material

- |                                    |              |                                |
|------------------------------------|--------------|--------------------------------|
| - disoluciones de agua y sal común | - termómetro | - soporte y polea              |
| - varios recipientes               | - balanza    | - inmersor de volumen conocido |
| - sal común                        | - agua       |                                |

### 4. Procedimiento experimental

1. Medir la temperatura de las disoluciones salinas facilitadas (0, 4, 8, 12, 16%).

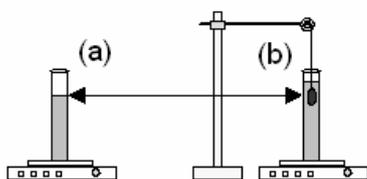


Fig. 2.2 Montaje experimental

2. Introducir una disolución en el recipiente. Poner el recipiente sobre la balanza y tararla (Fig. 2.1a).
3. Introducir el inmersor completamente en el líquido sin que toque las paredes ni el fondo y tratando de introducir la menor cantidad posible de hilo (Fig. 2.1b)

4. Tomar la lectura de la masa con su error ( $m_f$ ).

Al introducir el inmersor, éste desalojará una cierta cantidad de líquido y por tanto subirá el nivel en el recipiente. Por el principio de Arquímedes, el líquido empujará al inmersor con una fuerza: el empuje, es decir, el peso del fluido desalojado. Por la ley de acción y reacción, el inmersor también empujará al líquido con la misma fuerza en sentido contrario. Por tanto la lectura de la balanza indicará el peso del fluido desalojado por el inmersor. El peso del inmersor no aparecerá en la balanza, pues el inmersor lo sostiene la balanza. Como conclusión, la balanza medirá la masa del fluido desalojado ( $m_f$ ). Aplicando las expresiones (2.2) y (2.3) y el hecho del que el volumen del fluido desalojado coincide exactamente con el volumen del sólido sumergido (inmersor)  $V_f = V_s$

$$\text{Empuje} = m_f g = \rho_f V_f g = \rho_f V_s g \quad (2.5)$$

De ahí extraemos la densidad del fluido como

$$\rho_f = \frac{m_f}{V_s} \quad (2.6)$$

Si utilizamos la masa  $m_f$  en gramos, como el inmersor tiene un volumen de  $10 \text{ cm}^3$  (con un error del 1%) la densidad del fluido en  $\text{g/cm}^3$  la obtenemos directamente con

$$\rho_f (\text{g/cm}^3) = \frac{m_f (\text{g})}{10} \quad (2.7)$$

5. Repetir el procedimiento tres veces para cada disolución para detectar posibles dispersiones.

## 5. Análisis de los resultados

1. Representar gráficamente la densidad del fluido (eje X) y su concentración (eje Y). Si los puntos están dispuestos a lo largo de una recta, hallar su ecuación mediante un ajuste por mínimos cuadrados, siendo A la pendiente y B la ordenada en el origen.

$$C(\%) = A \rho_f (\text{g/cm}^3) + B \quad (2.8)$$

La importancia de esta ecuación radica en que: (1) nos relaciona la densidad y la concentración salina; (2) nos predice cuál será la concentración salina a partir de una cierta medida de la densidad de una disolución.

2. Calcular los errores de A y B. Deducir sus unidades.
3. Mediante el método de los logaritmos o el de las derivadas parciales, calcular el error de cada concentración a partir de la ecuación (2.4), teniendo en cuenta los errores en la masa de soluto y en la masa de la disolución debidos a la precisión de la balanza.
4. Calcular el error de cada densidad medida a partir de la ecuación (2.7), comentando, si ha lugar, las dispersiones observadas (apartado 4, sección 5). Incluir los errores de la densidad y la concentración en la gráfica como barras de error.
5. Verificar la validez de la predicción de la concentración. Para ello preparar una disolución con una concentración concreta  $C_p$  (por ejemplo del 10%). Medir experimentalmente el valor de la densidad  $\rho_p$ . A partir de este valor y la ecuación (2.8) predecir el valor de la concentración  $C_p'$ . Si nuestra predicción ha sido buena, hemos de obtener el mismo valor de la densidad, es decir  $C_p = C_p'$ . Discutir la validez de la predicción en función de las diferencias relativas que puedan existir entre  $C_p$  y  $C_p'$ . Para ello utilizar la ecuación (1.9) (reemplazando  $\rho_T$  por  $C_p$  y  $\rho_{\text{exp}}$  por  $C_p'$ ).
6. ¿Cuál es la validez de la ecuación (2.8)? Como ayuda, utilizar la tabla 3 del apéndice.

## PRÁCTICA 3. Medida de viscosidades: fluido newtoniano

### 1. Objetivos

Determinar la viscosidad de fluidos newtonianos mediante el viscosímetro de Cannon-Fenske, por comparación con la viscosidad del agua.

### 2. Introducción

#### Fluido

Las diferencias entre sólido, líquido y gas se pueden explicar en función de las fuerzas que ligan a las moléculas. En los sólidos las moléculas están rígidamente ligadas, por lo que tendrán forma y volumen definidos. En los líquidos, las moléculas no están unidas con la fuerza suficiente para mantener una forma, pero sí para mantener un volumen definido. El líquido se adapta al recipiente que lo contiene, pero mantiene su volumen (una tercio de cerveza se adapta a la botella o al vaso, pero su volumen sigue siendo de 33 cl). En los gases las moléculas no están unidas, por lo que carecen de forma y volumen definidos. Como tanto los líquidos como los gases pueden fluir se les llama fluidos.

#### Viscosidad

La viscosidad es una propiedad de los fluidos, relacionada con su movimiento. Desde hace siglos se sabe que el agua no se mueve sola. Los ríos fluyen porque hay una cierta pendiente desde donde nacen hasta el mar; para regar los campos era necesario hacer conductos inclinados para que el agua se moviera, y hoy en día se utilizan motores para bombear el agua. Todo esto sucede porque las moléculas del fluido chocan unas con otras y se pierde energía. Por eso hay que suministrar energía, (energía potencial con las pendientes, o presión) para mover los líquidos. La viscosidad es una propiedad de los fluidos que explica la relación entre la fuerza aplicada para moverlos y la velocidad con que se mueven. Imaginemos una botella de agua que se vacía al inclinarla. El agua fluye sin problemas pues su viscosidad es relativamente baja, sin embargo a la miel le cuesta mucho más fluir porque es mucho más viscosa. Un fluido newtoniano es aquel cuya viscosidad es constante (no depende de la fuerza que se le aplica para que fluya).

#### Ecuación de Poiseuille

Para que un fluido se mueva por una conducción cilíndrica a una cierta velocidad, debido a la viscosidad es necesario suministrarle una cierta presión. Existe una relación entre la presión aplicada (sobrepresión  $\Delta P$ ), la longitud  $L$  de la conducción, su radio  $R$ , su sección o superficie  $S$ , la velocidad  $v$  del fluido y su viscosidad  $\eta$ .

$$\Delta P = \frac{8\eta L}{\pi R^4} S v \quad (3.1)$$

Si la conducción es vertical, la sobrepresión que hará moverse el fluido estará causada por la diferencia de alturas del líquido (presión hidrostática). En la parte inferior de la conducción existe más presión al tener al líquido encima.

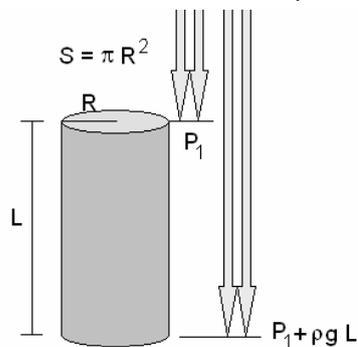


Figura 3.1. Conducción vertical

Así, la diferencia de presión entre los extremos de la conducción será

$$\Delta P = \rho g L \quad (3.2)$$

Sustituyendo en la ecuación (3.1) y teniendo en cuenta que la conducción tiene sección circular ( $\pi R^2$ )

$$\rho g L = \frac{8\eta L}{\pi R^4} S v = \frac{8\eta L}{\pi R^4} \pi R^2 \frac{L}{t} \quad (3.3)$$

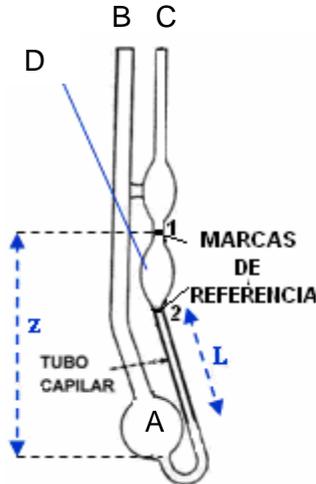
ya que la velocidad del fluido es

$$v = \frac{\text{espacio recorrido}}{\text{tiempo empleado}} = \frac{L}{t} \quad (3.4)$$

Simplificando la ecuación (3.3) podremos despejar la viscosidad como

$$\eta = \rho t \frac{gR^2}{8L} \quad (3.5)$$

Supongamos ahora que utilizamos una conducción y que medimos el tiempo  $t_1$  que tarda en fluir por ella un líquido 1 (con densidad  $\rho_1$  y viscosidad  $\eta_1$ ). Tras esto limpiamos la conducción, hacemos pasar un líquido 2 ( $\rho_2$  y  $\eta_2$ ) y medimos el tiempo  $t_2$  que tarda en fluir. Aplicando (3.5) a los dos líquidos



$$\eta_1 = \rho_1 t_1 \frac{gR^2}{8L}; \quad \eta_2 = \rho_2 t_2 \frac{gR^2}{8L} \quad (3.6)$$

Dividiendo ambas expresiones, el término  $\frac{gR^2}{8L}$  se simplifica por lo que obtenemos

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\rho_1 t_1}{\rho_2 t_2} \quad (3.7)$$

Podemos despejar la viscosidad del líquido 2

$$\eta_2 = \frac{\rho_2 t_2}{\rho_1 t_1} \eta_1 \quad (3.8)$$

Con la ecuación (3.8) podremos obtener la viscosidad de un cierto líquido problema.

Figura 3.2 Viscosímetro de Canon-Fenske

Partiremos de un líquido de referencia (agua), de densidad ( $\rho_1$ ) y viscosidad ( $\eta_1$ ) conocidas y mediremos el tiempo que tarda en fluir ( $t_1$ ) por una conducción. Haremos fluir el líquido problema de densidad conocida ( $\rho_2$ ) por la misma conducción y mediremos el tiempo que tarda ( $t_2$ ).

### 3. Material

- viscosímetro de Canon-Fenske
- termómetro
- pera de goma
- vasos de precipitados
- cronómetro
- jeringuilla
- líquido problema
- agua
- (etanol al 50% en masa)

### 4. Procedimiento experimental

1. Inyectar agua en el viscosímetro por la rama B hasta llenar el depósito A
2. Aspirar con la pera de goma por la rama C hasta que el agua ascienda por encima de las marcas de referencia.
3. Poner el viscosímetro en su soporte de manera que la rama B quede vertical. Retirar la pera de goma y medir el tiempo que tarda el líquido en fluir entre las marcas de referencia (con su error). El número de medidas necesarias vendrá dado por la desviación.
4. Limpiar el viscosímetro y repetir el procedimiento con el líquido problema

### 5. Análisis de los resultados

1. Calcular la densidad y viscosidad del agua con su error a la temperatura del laboratorio a partir de la tabla 1.
2. Obtener la densidad del líquido problema, con su error, a partir de la tabla 4.
3. Calcular la viscosidad del líquido problema con su error mediante la ecuación (3.8).
4. Comparar la viscosidad determinada con la viscosidad de la tabla 4: obtener la desviación relativa e hipotetizar sobre las posibles causas de las desviaciones.
5. Si es posible, medir la densidad del líquido problema con la balanza tal y como se describe en la práctica 2. Recalcular la viscosidad del líquido problema con la ecuación (3.8). Analizar la influencia de utilizar un valor de densidad tabulado o medido en la viscosidad del líquido problema.

## PRÁCTICA 4. Medida de viscosidades: fluido no newtoniano

### 1. Objetivos

Medida la viscosidad de dos fluidos y determinación del carácter newtoniano o no newtoniano.

### 2. Introducción

La viscosidad es una propiedad de los líquidos que explica la relación entre la fuerza aplicada para moverlos y la velocidad con que se mueven. Al analizar el movimiento de un fluido viscoso, también hay que tener en cuenta la superficie de fluido que está en movimiento. Además hay que considerar que, debido a la viscosidad, no todas las capas del fluido se moverán a la misma velocidad (Fig. 4.1)

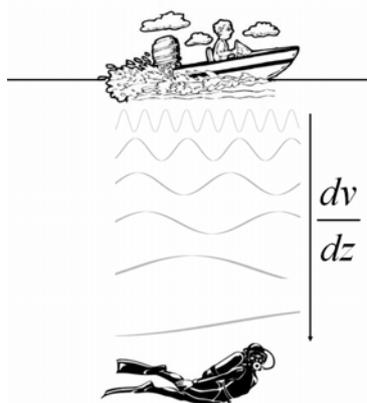


Fig. 4.1 La velocidad con la que se mueven las capas de agua debido al paso de la lancha disminuye con la profundidad: hay un gradiente de velocidades.

Un barco que flota tiene su peso compensado por el empuje del fluido, es decir, no pesa nada. Sin embargo los barcos más grandes necesitan remolcadores más potentes para ser arrastrados que los pequeños. La razón principal es que los barcos más grandes están en contacto con mayor superficie de fluido, y hará falta una fuerza mayor para mover el fluido. A mayor superficie de fluido, hará falta hacer más fuerza para moverlo, pues habrá más fricción entre las moléculas. La relación entre las magnitudes que hemos mencionado es

$$F = S\eta \frac{dv}{dz} \quad (4.1)$$

donde F es la fuerza aplicada, S la superficie de fluido que se mueve.

El término  $dv/dz$  es el gradiente de velocidades (la velocidad cambia con la profundidad). La fuerza además dependerá de la facilidad con la que se desplace el fluido bajo la acción de la fuerza: la viscosidad  $\eta$ . La expresión (4.1) suele expresarse como

$$\frac{F}{S} = \eta \frac{dv}{dz} \rightarrow \tau = \eta \dot{\gamma} \quad (4.2)$$

donde  $\tau$  es el esfuerzo de cizalla y  $\dot{\gamma}$ , la velocidad de cizalla o agitación.

En los fluidos newtonianos la viscosidad es independiente del esfuerzo de cizalla, como el caso del agua: el reograma  $\tau = f(\dot{\gamma})$  dará una recta. Sin embargo en los fluidos no newtonianos la viscosidad puede disminuir con el esfuerzo de cizalla (como en el yogur o la pintura plástica) o aumentar (mezcla espesa de almidón de maíz y agua). El reograma  $\tau = f(\dot{\gamma})$  dará una curva con pendiente descendente, si la viscosidad disminuye con la agitación o ascendente, si la viscosidad aumenta.



Fig. 4.2 Viscosímetro Brookfield

#### Viscosímetro rotatorio

Mide la viscosidad haciendo girar un cilindro (husillo o *spindle*) en el seno de un fluido. Un motor, de velocidad regulable, hace girar el husillo. Las fuerzas de viscosidad dificultarán el giro del husillo (ejercerán un momento de una fuerza). Es posible medir esa oposición al movimiento del husillo mediante un muelle calibrado. El viscosímetro Brookfield es uno de lo más utilizados en la industria. Ofrece una precisión del 1% cuando se utilice el husillo y la velocidad de giro adecuados al valor de la viscosidad. Así tenemos:

- Mínimo intervalo de medida (viscosidades pequeñas): husillo mayor y mayor velocidad
- Máximo intervalo de medida (viscosidades grandes): husillo menor y menor velocidad

El fabricante proporciona la conversión entre velocidad angular del motor en revoluciones por minuto ( $\omega$ ) y velocidad de cizalla ( $\dot{\gamma}$ ), siempre que el recipiente que contenga al líquido sea mucho mayor que el husillo. La conversión es

$$\dot{\gamma}(s^{-1}) = 0.209 \omega(rpm) \quad (4.3)$$

### 3. Material

- viscosímetro rotatorio
- líquidos problema (carbopol y aceite de coche)

### 4. Procedimiento experimental

1. Las instrucciones de uso de cada viscosímetro se encuentran junto al aparato.
2. No cambiar el husillo del viscosímetro. Al mantener siempre el mismo husillo consideraremos que la precisión en la viscosidad es de un 5%. Se utilizará un viscosímetro distinto para cada líquido problema.
3. Seleccionar la velocidad angular (rpm) más baja, esperar a que se estabilice y anotar la lectura de  $\omega$ , viscosidad (en mPa s) y el porcentaje que indica la deformación del muelle.  
**Aviso:** Si tras 20-25 segundos no aparece ninguna lectura es que la velocidad es demasiado pequeña. En cambio, si sonara un pitido tipo alarma (no un pitido simple), la velocidad será demasiado elevada. En ambos casos se excluirá la medida.
4. Aumentar la velocidad y esperar a que se estabilice la lectura antes de tomar la siguiente medida. Llegar hasta la velocidad más elevada (ver aviso en el punto anterior)
5. Tomar datos haciendo el recorrido inverso de velocidades hasta la velocidad más baja.
6. Tomar datos volviendo a ascender las velocidades hasta la velocidad más alta. De esta manera habremos tomado tres veces la viscosidad para cada velocidad.

### 5. Análisis de los resultados

1. Obtener la velocidad de cizalla con su error para cada velocidad angular utilizando la ecuación (4.3). Obtener el esfuerzo de cizalla y su error a partir de las medidas de viscosidad y la expresión (4.2).
2. Para cada líquido representar gráficamente los reogramas: (1) viscosidad en función de velocidad de cizalla; (2) esfuerzo de cizalla en función de velocidad de cizalla.
3. El porcentaje de deformación del muelle en una medida válida ha de ser mayor del 10% y menor del 80-90%. Utilizar dichos valores para evaluar la calidad de los puntos representados en el apartado anterior. Volver a trazar las figuras, si fuera necesario descartar alguna medida. Analizar los resultados.
4. A partir de la pendiente del reograma  $\tau = f(\dot{\gamma})$  deducir el carácter newtoniano o no newtoniano de los líquidos.
5. Ajustar a una recta el reograma  $\tau = f(\dot{\gamma})$  del líquido newtoniano.
6. Ajustar a una función del tipo  $\tau = m\dot{\gamma}^n$  el reograma del líquido no newtoniano, siendo m la consistencia y n el índice de pseudoplasticidad.
7. Estudia la influencia en el error de la velocidad de cizalla y en del esfuerzo de cizalla el hecho de considerar que el error de la velocidad angular es de 0.1 rpm.

## PRACTICA 5. Medida de la tensión superficial: estalagmómetro

### 1. Objetivos

Determinar la constante de un estalagmómetro. Obtener la tensión superficial de un líquido problema a partir de la del agua.

### 2. Introducción

#### Tensión superficial

Un líquido mantiene su estructura por las fuerzas que juntan las moléculas entre sí. Cada molécula se mantiene unida a las moléculas que tiene a su alrededor. Sin embargo, las moléculas de la superficie del fluido no tienen moléculas por encima.

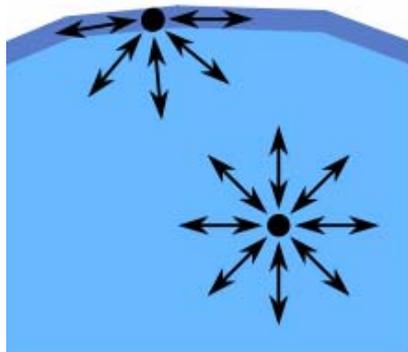


Figura 5.1a Diagrama de fuerzas de las moléculas del fluido



Figura 5.1b Si el clip no ejerce bastante trabajo no se romperá la superficie del agua. El clip es de acero y no está flotando.

Esto da lugar a una fuerza resultante en la superficie del fluido (Fig. 5.1a) que cohesiona más fuertemente las moléculas de dicha superficie. La fuerza resultante hace necesario un cierto trabajo para modificar la superficie del fluido. Si se ejerce menos trabajo, la superficie se resistirá a cambiar de forma (Fig. 5.1b).

El trabajo necesario para modificar la superficie de un fluido dependerá del tamaño de la superficie (a más superficie, más trabajo). Por eso el trabajo para modificar la superficie ( $\Delta W$ ) suele hacerse relativo al tamaño de la superficie ( $\Delta S$ ): la tensión superficial  $\sigma$  (medida en  $\text{J/m}^2$  o en  $\text{N/m}$ )

$$\sigma = \frac{\Delta W}{\Delta S} \quad (5.1)$$

La determinación de la tensión superficial es importante en la industria por su influencia en diversos fenómenos: formación de gotas, aplicación de recubrimientos en superficies (pinturas, barnices, tratamiento de lentes) y diseño de tensioactivos pulmonares (para facilitar la formación de burbujas de oxígeno que absorben los pulmones).

#### Ley de Tate



Figura 5.2 Formación de

La tensión superficial hace que la superficie del agua se resista a cambiar de forma cuando fluye. Una manera de resistirse al cambio es ocupando la menor superficie posible (igual que nos resistimos a que nos quiten la chaqueta recogiendo el cuerpo como una bola).

Para un cierto volumen de agua, se puede demostrar geoméricamente que la menor superficie posible es la esfera, de ahí la forma de las gotas. Cuando se utiliza un cuentagotas (o un estalagmómetro), el líquido normalmente no cae. La tensión superficial impide que el fluido cambie de forma, es decir, que fluya por la abertura estrecha. Se ha de ejercer un trabajo al presionar para que salga el líquido. La tensión superficial hace que se ofrezca una resistencia al cambio de forma y se consigue una forma redondeada sin romperse la superficie.

una gota en un cuentagotas

Llega un momento en que el peso del agua es demasiado grande y se rompe la superficie. El fluido tiende a ocupar, de nuevo la mínima superficie y da lugar a una gota esférica. La ley de Tate, ecuación (5.2), relaciona el peso de una gota en el momento de desprenderse con la tensión superficial del líquido y con una constante que sólo depende del estalagmómetro. En concreto, la constante sólo depende del radio de la abertura del estalagmómetro y es independientemente del líquido que se utilice.

$$mg = k\sigma \quad (5.2)$$

donde  $m$  es la masa de una gota;  $g$  es la aceleración de la gravedad;  $\sigma$  es la tensión superficial y  $k$  es la constante del estalagmómetro.

En esta práctica utilizaremos la ley de Tate para calcular la constante del estalagmómetro y la tensión superficial de un líquido problema.

### 3. Material

- |  |               |                |
|--|---------------|----------------|
| - estalagmómetro                               | - cuentagotas | - agua         |
| - vaso de precipitados                         | - termómetro  | - pera de goma |
| - líquido problema<br>(alcohol al 50% en masa) | - balanza     | - jabón        |

### 4. Procedimiento experimental

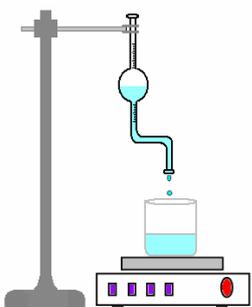


Fig. 5.3 Estalagmómetro y balanza

1. Anotar la temperatura del agua con su error.
2. Con el cuentagotas introducir en el estalagmómetro una cantidad suficiente de agua.
3. Pesar en el vaso de precipitados 20 gotas de agua con su error con el estalagmómetro. Repetir el procedimiento tres veces y evaluar si hay medidas suficientes a partir de la dispersión.
4. A partir de la masa de 20 gotas de agua, obtener la masa de una gota de agua ( $m_1$ ) con su error.

**IMPORTANTE:** no tocar con los dedos la salida del estalagmómetro porque podría dañarse

5. Secar el estalagmómetro, la balanza y el cuentagotas.
6. Repetir los pasos 1 al 4 reemplazando el agua por el líquido problema.

### 5. Análisis de los resultados

1. Obtener la tensión superficial del agua a partir de su temperatura y la tabla 1.
2. Aplicando la ley de Tate al agua (ecuación 5.2) obtener la constante del estalagmómetro  $k$ , con su error. Deducir sus unidades.
3. Obtener la tensión superficial del líquido problema (valor medido), con su error, a partir de la ley de Tate, donde  $m_2$  es la masa de una gota del líquido problema

$$m_2g = k\sigma_2 \quad (5.3)$$

4. A partir de la temperatura del líquido problema y la tabla 4 obtener su tensión superficial (valor tabulado).
5. Analizar la exactitud de la medida de la tensión superficial del líquido problema a partir de la desviación relativa entre el valor medido y el valor tabulado.
6. Repetir el experimento añadiendo unas gotas de jabón al agua. Discutir los resultados.
7. Razonar por qué calculamos la masa de una gota pesando 20 gotas en vez de, directamente, pesar la masa de una sola gota.
8. ¿Qué permite que se venza la tensión superficial del líquido en el estalagmómetro? Si tapamos con el dedo la abertura superior del estalagmómetro dejan de caer gotas, así que no se trata de la fuerza de la gravedad.
9. ¿Por qué hemos utilizado el estalagmómetro y no el cuentagotas para medir la tensión superficial?

## PRÁCTICA 6. Ley de enfriamiento

### 1. Objetivos

Comprobar la ley de enfriamiento. Predecir la evolución de la temperatura de un sistema durante su enfriamiento.

### 2. Introducción

Cuando un cuerpo se encuentra a más temperatura que la de su entorno, pierde energía en forma de calor. Existen tres procedimientos para la transferencia de calor.

#### Conducción

La conducción está relacionada con el aumento de energía interna. La energía interna es la vibración de los átomos y de los electrones libres. Al calentarse una sustancia, los átomos vibran más deprisa y chocan con los átomos vecinos haciéndolos vibrar, a su vez, más deprisa. Así se transmite el calor. Pero como los átomos están ligados en el sólido, su movimiento está restringido y la transferencia de calor por vibraciones atómicas es lenta. En algunos materiales existen electrones libres (no están atados a un núcleo y se mueven por todo el material, como en los metales) que al ganar energía la transfieren rápidamente a los átomos y electrones adyacentes. Por eso los metales son buenos conductores del calor.

#### Convección

Aparece en los fluidos cuando no todas sus partes se encuentran a la misma temperatura. Sabemos que los fluidos menos densos (como el aceite) flotan encima de los más densos (como el agua). También que la densidad del fluido disminuye al aumentar la temperatura (como el aire caliente de los globos aerostáticos, que los hace ascender). De esta manera, las partes más calientes del fluido serán menos densas y ascenderán en forma de corrientes (Fig. 6.1)

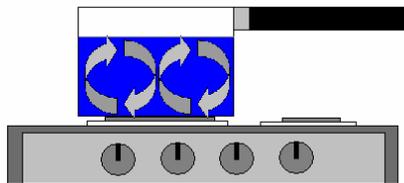


Figura 6.1 Al calentar agua al fuego se producen corrientes de convección

Al ascender, el fluido a mayor temperatura cede parte de su calor a otras partes de fluido más frías por conducción. Al enfriarse, el fluido desciende y el ciclo vuelve a empezar. Son las llamadas corrientes de convección.

La convección aparece en sistemas pequeños como unas pocas moléculas y también en sistemas muy grandes como la atmósfera, los mares y el manto terrestre.

#### Radiación

Todos los cuerpos emiten radiación debido a la temperatura a la que se encuentran. A temperatura muy elevada, la radiación que emiten es visible (por ejemplo un metal al rojo vivo o el filamento de una bombilla). Cuando el cuerpo está a temperatura ambiente, la radiación emitida no es visible. Stefan y Boltzmann dedujeron que la radiación emitida es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura y que también influyen las características de emisión del material.

#### Ley del enfriamiento

Cuando un sistema se encuentra a una temperatura mayor que su entorno, pierde energía en forma de calor por los tres mecanismos descritos.

De esta manera la temperatura del sistema va disminuyendo gradualmente, hasta alcanzar la temperatura del ambiente (Fig. 6.2). Matemáticamente podemos describir la evolución de la temperatura del sistema con el tiempo, si conocemos la temperatura inicial y la temperatura del entorno

$$T = T_a + (T_0 - T_a)e^{-kt} \quad (6.1)$$

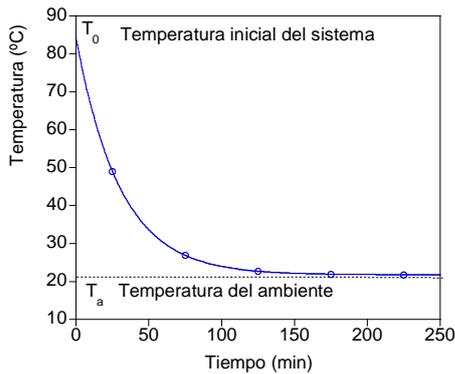


Fig. 6.2 Enfriamiento de un sistema

donde  $t$  es tiempo;  $T_0$  es la temperatura inicial del sistema;  $T_a$  la temperatura del entorno;  $k$  es una constante que depende de la superficie del sistema ( $S$ ), su masa ( $m$ ), su calor específico ( $c_e$ , asumiendo que es constante) y una constante  $N$ , relacionada con cómo intercambia calor el sistema.

$$k = \frac{NS}{mc_e} \quad (6.2)$$

En el proceso de enfriamiento, el entorno no ve alterada significativamente su temperatura, pues la energía recibida es despreciable en términos relativos a su tamaño.

### 3. Material

- microondas
- 2 vasos de precipitados
- agua
- superficie aislante
- cronómetro
- termómetros

### 4. Procedimiento experimental

1. Tomamos dos vasos de precipitados de distinta capacidad ( $100 \text{ cm}^3$  y  $150 \text{ cm}^3$ ) y los llenamos de agua. Serán los sistemas que vamos a enfriar.
2. Calentamos los dos vasos en el microondas hasta que alcancen una temperatura aproximada de  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ .
3. Con precaución, para evitar quemaduras, los disponemos sobre la superficie aislante. Tomamos la temperatura inicial de cada sistema y la temperatura ambiental, con sus respectivos errores
4. Tomamos la temperatura de ambos sistemas (con sus respectivos errores) cada minuto durante 45-60 minutos, así como la temperatura ambiental.

### 5. Análisis de los resultados

1. ¿Por qué al calentar los dos vasos en el microondas a la vez no alcanzan la misma temperatura?
2. Si la precisión del cronómetro es de 1 centésima de segundo, calcular el error relativo que cometemos si la unidad de tiempo es el minuto. ¿Qué conclusiones prácticas podemos extraer del valor del error relativo del tiempo?
3. Representar gráficamente la temperatura de cada sistema en función del tiempo.
4. Obtener la constante de enfriamiento de cada sistema. Para ello operaremos con la ecuación (6.1) despejando la exponencial y aplicando logaritmos neperianos

$$\frac{T - T_a}{T_0 - T_a} = e^{-kt} \rightarrow \ln\left(\frac{T - T_a}{T_0 - T_a}\right) = -kt \quad (6.3)$$

Llamando  $H$  al argumento del logaritmo (entre paréntesis) tendremos

$$\ln(H) = -kt \quad (6.4)$$

Representar gráficamente  $\ln(H)$  en función del tiempo. Si los puntos se disponen a lo largo de una recta, encontrar su ecuación por el método de los mínimos cuadrados. Obtener  $k$  a partir de la pendiente de la recta.

5. Discutir los valores de  $k$  de cada sistema en función de las magnitudes de la ecuación (6.2).
6. A partir de la ecuación del ajuste, calcular el tiempo necesario para que cada sistema alcance la temperatura ambiente. Ese instante lo describiremos matemáticamente como que la diferencia entre la temperatura del sistema ( $T$ ) y la temperatura ambiente ( $T_a$ ) sea tan pequeña que el termómetro no pueda apreciarla. Si la precisión del termómetro es  $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ , consideraremos equilibrio cuando  $T - T_a = 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ . ¿Qué habría que hacer para comprobar la predicción?

## PRÁCTICA 7. Medidas de sonido

### 1. Objetivos

Medir el nivel de ruido en varios lugares del Campus y analizar los resultados. Medir la atenuación del sonido al atravesar una puerta. Realizar la medición del sonido de sucesos puntuales e interpretarlos.

### 2. Introducción

#### *Sonido*

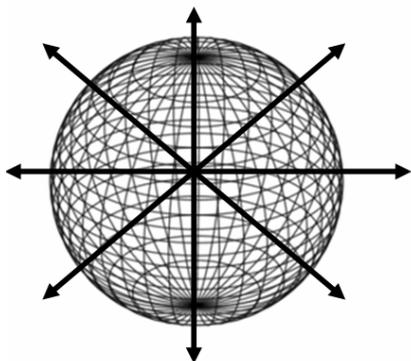
El oído es uno de nuestros sentidos, quizá uno de los determinantes para nuestra supervivencia durante miles de años. Aunque nos permitió detectar a nuestros depredadores y huir, hoy en día lo utilizamos principalmente para comunicarnos y para divertirnos. El sonido empieza cuando un cierto elemento hace vibrar el aire. La vibración llega a nuestro tímpano, que es una membrana muy sensible a la que se le transmite la vibración del aire. Esa vibración se propaga dentro de nuestro oído y estimula unas terminaciones nerviosas conectadas al cerebro, el cual interpreta el sonido.

#### *Percepción del sonido*

Nuestra percepción de la intensidad del sonido es subjetiva, ya que sólo podemos decir si un sonido es más o menos fuerte; además la percepción varía de una persona a otra. El ruido es un sonido no deseado, formado una superposición de sonidos de diferentes frecuencias. Cuando supera un cierto nivel se le llama contaminación acústica, pues resulta dañino. En los últimos años se ha legislado sobre el ruido para proteger a los ciudadanos. Existen una serie magnitudes físicas que permiten medir y controlar el ruido.

#### *Nivel de intensidad*

El sonido es una onda mecánica: es energía que se propaga dentro de un medio material, sin que exista transmisión de materia. La energía que produce la onda se caracteriza por su potencia  $P$  (energía suministrada por unidad de tiempo). Al alejarnos de la fuente del sonido percibimos el sonido cada vez más débil. La explicación es que el sonido se propaga en las tres direcciones del espacio. El sonido es una vibración del aire y, el hecho de propagarse significa que se hace vibrar a cada vez más moléculas de aire. Para hacer vibrar estas moléculas se consume energía, de manera que la energía de la onda se ha de repartir para todos los puntos y como consecuencia el sonido se hace más débil cuanto más nos alejamos de la fuente, es decir, se amortigua. Un modo de caracterizar la amortiguación del sonido a una cierta distancia  $r$  de la fuente es mediante la intensidad de la onda  $I$ . La intensidad es la potencia de la onda dividida por la superficie de la esfera de radio  $r$  con centro en la fuente del sonido.



**Fig. 7.1** La energía de la onda de sonido se reparte en todos los puntos del espacio. A todos los puntos de una esfera centrada en el foco del sonido les llega el sonido igual de fuerte: la potencia se reparte en la superficie esférica.

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (7.1)$$

donde  $4\pi r^2$  es la superficie de la esfera. En otras palabras, el sonido se propaga como las capas de una cebolla. Cerca del núcleo, el sonido es más fuerte porque la energía se reparte en una capa de menor tamaño: mayor intensidad. En la capa exterior, la energía se reparte en una superficie mucho mayor, por lo que la intensidad es menor.

Las unidades de intensidad son vatio por metro cuadrado ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). Nuestro oído puede oír desde un susurro (límite de audición,  $10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$ ) hasta un sonido tan fuerte que se percibe como dolor (límite de dolor,  $1 \text{ W}/\text{m}^2$ ).

Para abarcar estos 12 órdenes de magnitud, entre  $10^{-12}$  y 1, se utiliza una escala logarítmica: el 2 no es el doble de 1, sino 100 veces más; el tres no es el triple de 1, sino 1000 veces más. Esta escala recibe el nombre de nivel de intensidad  $\beta$  (sensación sonora o nivel sonoro) y se mide en decibelios (dB)

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (7.2)$$

Donde  $I_0=10^{-12}$  W/m<sup>2</sup> es el umbral de audición. De esta manera, la escala varía entre 0 (no oímos nada) y 120 dB, cuando sentimos dolor. Sin embargo en los locales en los que el nivel de intensidad sea superior a 90 dB ha de colocarse por ley un aviso perfectamente visible sobre sus consecuencias nocivas.

#### Transmisividad

Cuando el sonido se encuentra con un medio material, como una pared, experimenta una reducción brusca de su intensidad. Se necesita mucha más energía para hacer vibrar las moléculas de ladrillo, de hormigón o de corcho, que para hacer vibrar las del aire. Además, cuanto más espesor de material, más disminuye la intensidad de la onda.

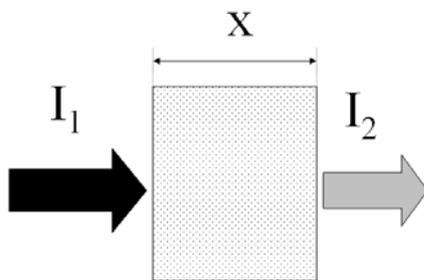


Fig. 7.2 Absorción de una onda por un medio material

Este fenómeno de disminución de la intensidad del sonido recibe el nombre de absorción, y puede ser descrito a través de la ley de Lambert-Beer

$$I_2 = I_1 e^{-\alpha x} \quad (7.3)$$

donde:  $I_1$  es la intensidad incidente en el medio material;  $I_2$  es la intensidad a la salida del medio;  $x$  (en metros) es la distancia recorrida dentro del medio; y  $e$  es la base del logaritmo neperiano.

El coeficiente  $\alpha$  (en m<sup>-1</sup>) cuantifica de qué manera absorbe el medio.

Un medio con un  $\alpha$  elevado absorbe rápidamente un sonido que lo atraviesa. Un modo sencillo de abordar la absorción es mediante la transmisividad del medio  $\tau$ , que es el cociente de intensidades

$$\tau = \frac{I_2}{I_1} \quad (7.4)$$

La transmisividad varía entre 0 (ningún sonido atraviesa el medio material) y 1 (todo el sonido atraviesa).

#### Sonómetro



Fig. 7.3 Sonómetro digital

Un sonómetro permite medir directamente el nivel de intensidad del sonido. Consta de un micrófono, un circuito que hace la media cuadrática de las medidas en un cierto tiempo (entre 0.125 y 1 segundo) y un display digital. El instrumento tiene la opción de mostrar el valor de cada instante o el valor máximo alcanzado mientras esté en funcionamiento. Para evitar dañar el instrumento, tomar la precaución de no gritar ni golpear sobre el micrófono.

### 3. Material

- sonómetro
- cinta métrica
- cronómetro
- lector de mp3 con auriculares
- muestras musicales

#### 4. Procedimiento experimental

1. Elegir 5 sitios representativos del Campus, en los que se intuya que los niveles de intensidad van a ser diferentes. En cada sitio, anotar el nivel de intensidad cada 10 segundos durante 4 minutos.
2. Elegir un lugar en que exista una puerta que podamos abrir y cerrar. Medir el nivel de intensidad con la puerta abierta y cerrada, según el mismo patrón temporal que en el apartado 4.1.
3. Medir el nivel de intensidad de algunos sucesos puntuales (por ejemplo tos, estornudo, móvil sonando, silbido, grito a cierta distancia...), tomando nota de la distancia al sonómetro.
4. Medir el nivel de intensidad que recibimos al escuchar música. Para ello medir el nivel de intensidad máximo de la frecuencia de referencia de 1000 Hz y de las piezas musicales propuestas, sonando por los auriculares a distintos volúmenes.

#### 5. Análisis de los resultados

1. Calcular el nivel de intensidad medio  $\bar{\beta}$  de los sitios elegidos en el apartado 4.1. Abordaremos las medidas de modo estadístico y obtendremos la precisión de la medida a partir del llamado error estándar de la media, calculado según

$$\varepsilon(\beta) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\beta_i - \bar{\beta})^2}{N(N-1)}} \quad (7.5)$$

donde  $\beta_i$  es cada una de las medidas realizadas, y N el número de medidas.

2. Realizar el diagrama de barras (Fig. 7.4) de las medidas, donde la altura de la barra es la media, y la barra de error viene dada por la ecuación (7.5).

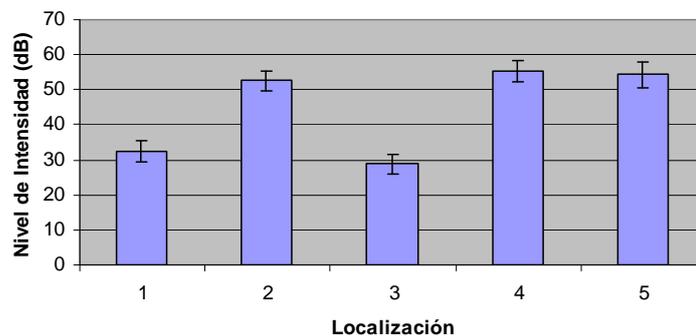


Fig. 7.4 Diagrama de barras del nivel de intensidad.

Interpretar el nivel de intensidad obtenido para cada sitio teniendo en cuenta el criterio con el que se eligieron como sitios de medida. Verificar si estos valores están de acuerdo con la legislación vigente (Ley 7/2002, de 3 de diciembre, de protección contra la contaminación acústica).

3. Para un suceso puntual que se haya podido medir el nivel de intensidad con claridad, determinar su intensidad a partir de la ecuación (7.2), y la potencia a partir de la ecuación (7.1).
4. Determinar, para cada muestra musical del apartado 4.4, a partir de qué volumen resulta nocivo escuchar música con auriculares (90 dB). Discutir las posibles diferencias entre los valores para las muestras.
5. A partir de la medida del apartado 4.2 y la ec. (7.4), determinar la transmisividad de la puerta con su error. Como herramientas matemáticas tenemos:

Ecuación logarítmica	Derivadas
Obtener $I_1$ a partir de $\beta_1 = 10 \log \frac{I_1}{I_0}$ ;	$h_1 = 10^x$ ; $h_1' = 10^x \ln(10)$
$\frac{\beta_1}{10} = \log \frac{I_1}{I_0} \rightarrow 10^{\frac{\beta_1}{10}} = \frac{I_1}{I_0} \rightarrow I_1 = I_0 10^{\frac{\beta_1}{10}}$	$h_2 = 10^{\frac{x}{10}}$ ; $h_2' = 10^{\frac{x}{10}} \ln(10) \frac{1}{10}$

## PRÁCTICA 8. Medida de índices de refracción

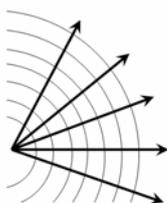
### 1. Objetivos

Determinar el índice de refracción de varias disoluciones de agua y azúcar. Predecir el contenido en azúcar de una disolución a partir de la medida del índice de refracción, y validar la predicción. Determinar el contenido en azúcares de un zumo comercial.

### 2. Introducción

#### Índice de refracción

La luz es una onda que puede describirse utilizando el concepto de rayo (Fig. 8.1), un haz de luz muy estrecho. Se ha observado que la velocidad de la luz no es la misma en todos los medios. La velocidad de la luz en el vacío es exactamente 299 792 458 metros por segundo, pero es inferior cuando la luz atraviesa otro medio.



Para describir cómo de diferente es la velocidad de la luz en un cierto medio, respecto a la velocidad en el vacío se introduce el llamado índice de refracción  $n$

$$n = \frac{c}{v}, \quad (8.1)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $v$  la velocidad de la luz en el medio en cuestión.

Fig. 8.1 Concepto de rayo

Por ejemplo, el índice de refracción del agua pura es, aproximadamente 1.33, lo que significa que el agua viaja 1.33 veces más rápido en el vacío que en el agua. Cuando la luz se acerca a un medio con diferente índice de refracción, parte de la luz se refleja y el resto pasa al segundo medio (se refracta). Se observa experimentalmente (por ejemplo introduciendo una cuchara en un vaso de agua), que los rayos de luz cambian de trayectoria cuando entran en el otro medio (Fig. 8.2a). Existe una relación entre los ángulos de la luz y los índices de refracción de los medios, la llamada ley de Snell

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r \quad (8.1)$$

donde:  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción de los dos medios;  $\theta_i$  es el ángulo de incidencia;  $\theta_r$  es el ángulo de refracción. Ambos ángulos se miden respecto a la recta perpendicular a la superficie de separación entre los dos medios (interfaz). La ecuación (8.1) es válida siempre que los medios sean isótropos, es decir uniformes en todas direcciones.

#### Ángulo límite

Cuando la luz viaja de un medio de mayor índice de refracción a otro medio de menor índice de refracción (por ejemplo, de vidrio con  $n_1=1.75$  a agua con  $n_2=1.33$ ), existe un ángulo de incidencia (ángulo límite  $\theta_L$ ) para el cual el ángulo de refracción es de  $90^\circ$ , es decir, la luz no cambia de medio, sino que se mueve por la interfaz (Fig. 8.2b). Aplicando (8.1) obtendremos la ecuación (8.2)

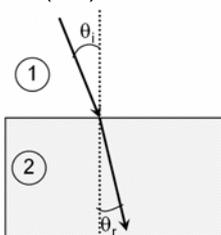


Fig. 8.2a Refracción de la luz

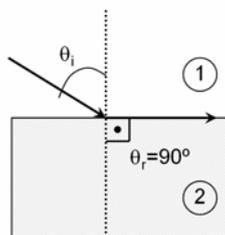


Fig. 8.2b Ángulo límite

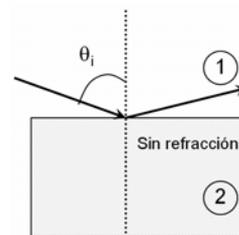


Fig. 8.2c Reflexión interna total

$$n_1 \sin \theta_L = n_2 \sin 90^\circ \rightarrow \theta_L = \arcsin(n_2 / n_1) \quad (8.2)$$

Para ángulos mayores que el ángulo límite sólo se producirá reflexión, la llamada reflexión interna total (Fig. 8.2c). Cuando, en vez de agua, se trate de una disolución con índice de refracción  $n_2$  desconocido, si se conoce el ángulo límite y se conoce el índice de refracción del primer medio  $n_1$ , es posible conocer  $n_2$  aplicando la ecuación (8.2). Es la base del refractómetro (Fig. 8.3).



**Fig. 8.3** Refractómetro manual. El refractómetro está diseñado para que la luz de una fuente llegue, al menos, en el ángulo límite a un prisma de  $n_1$  conocido. A continuación se sitúa una fina película de una disolución problema ( $n_2$  desconocido). La luz sale del prisma según las figuras 8.2b y 8.2c e ilumina una escala calibrada en la que se lee directamente el índice de refracción del líquido problema.

#### Escala Brix

El grado Brix ( $^{\circ}\text{Bx}$ ) es una unidad representativa del contenido en azúcar de una disolución acuosa. 1 grado Brix corresponde a 1 gramo de sacarosa (azúcar de mesa) en 100 gramos de disolución. P.e.  $13^{\circ}\text{Bx}$  correspondería a

$$13^{\circ}\text{Bx} = \frac{13 \text{ g sacarosa}}{100 \text{ g disolucion}} = \text{concentracion del 13\% (en masa)} \quad (8.3)$$

Si la disolución contiene otros sólidos disueltos diferentes de la sacarosa pura, como otros azúcares, minerales, ácidos... (como el caso del zumo de fruta), entonces la escala Brix expresa aproximadamente la cantidad de azúcares disueltos. Conocer esta información es de gran importancia en la industria de producción de zumo, vino, almidón y azúcar. Por ejemplo, en la industria vinícola, la escala Brix informa de la cantidad de azúcares presentes en los mostos, que serán determinantes en la calidad final del vino tras la fermentación. El índice de refracción de una disolución dependerá del número de partículas que contenga, pues son las que harán que disminuya la velocidad de la luz. En nuestro caso las partículas disueltas son de sacarosa y estudiaremos la relación entre el índice de refracción y la concentración en sacarosa.

### 3. Material

- termómetro
- fuente de luz
- refractómetro manual
- zumo comercial
- sacarosa
- balanza de precisión
- disolución de control
- cuentagotas

### 4. Procedimiento experimental

1. Levantar la tapa protectora del refractómetro. Limpiar y secar el prisma. Depositar unas gotas de líquido y cerrar la tapa. Sostener el instrumento apuntándolo hacia la luz y mirar por el visor (en negro, figura 8.3). El límite de la parte iluminada (correspondiente al ángulo límite) indica en la escala el índice de refracción.
2. El índice de refracción del agua pura ( $0^{\circ}\text{Bx}$ ) con la temperatura aparece en la tabla 1. Comprobar que la medida para el agua es correcta. Recalibrar el refractómetro si fuera necesario, con el tornillo.
3. Preparar 5 disoluciones de sacarosa en agua entre  $5$  y  $16^{\circ}\text{Bx}$ .
4. Con el refractómetro medir el índice de refracción de cada disolución, con su error.
5. Medir el índice de refracción de la disolución control y del zumo, con sus errores.

### 5. Análisis de los resultados

1. Calcular el error cometido en la concentración de las disoluciones debido a la precisión de la balanza.
2. Representar gráficamente el índice de refracción ( $X$ ) en función de la concentración de sacarosa ( $Y$ ), incluyendo las barras de error. Encontrar los parámetros (con su error) de la ecuación que relaciona ambas variables.
3. Utilizando la ecuación del apartado anterior, predecir la concentración de azúcares del zumo.
4. Utilizar que conocemos la concentración de sacarosa de la disolución control ( $C_{\text{control}}$ ) para estimar el error de la predicción. Medir el índice de refracción de la disolución de control. Utilizando la ecuación obtenida en el apartado 5.2 predecir la concentración en sacarosa ( $C_{\text{predicción}}$ ) correspondiente. Idealmente debería cumplirse que  $C_{\text{control}} = C_{\text{predicción}}$ , pero como no será así, utilizaremos la desviación relativa entre ambos valores como el error de la predicción. Este valor de error relativo se lo aplicaremos a la predicción hecha para el zumo en el apartado 5.3

$$DR(\%) = \frac{C_{\text{control}} - C_{\text{prediccion}}}{C_{\text{control}}} 100, \quad (8.4)$$

6. Dependiendo de la cosecha (ocurrencia de sol, frío, lluvia, plagas...), la dulzura de la fruta varía. ¿Cómo es posible que los fabricantes de zumo consigan un sabor dulce constante si la ley prohíbe añadir azúcar?

## Apéndice

**Tabla 1.** Densidad, viscosidad y tensión superficial del agua en función de la temperatura

Temperatura (°C)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Tensión superficial (N/m)	Viscosidad (mPa s)	Índice de refracción (a 589.3 nm)
0	0.99984		1.793	0.0757
5	0.99996			
10	0.99970	0.07423		
15	0.99910			
20	0.99821		1.002	1.33334
25	0.99701	0.07199	0.890	1.33285
30	0.99565			1.33228
35	0.99403			
50	0.98804	0.06794	0.547	

**Tabla 2.** Densidades de sólidos a temperatura ambiente 20-25°C

Material	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Aluminio	2.7
Hueso	1.7-2.0
Vidrio	2.4-2.8
Acero inoxidable	7.8
Plomo	11.3

**Tabla 3.** Densidades de disoluciones de cloruro sódico en agua. Valores para 20 °C

Concentración (%)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Concentración (%)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
0.5	1.0018	10.0	1.0707
1.0	1.0053	12.0	1.0857
2.0	1.0125	14.0	1.1008
3.0	1.0196	16.0	1.1162
4.0	1.0268	18.0	1.1319
5.0	1.0340	20.0	1.1478
6.0	1.0413	22.0	1.1640
7.0	1.0486	24.0	1.1804
8.0	1.0559	26.0	1.1972
9.0	1.0633		

**Tabla 4.** Densidad y tensión superficial en función de la temperatura para ciertas sustancias

Etanol	0 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	50 °C
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )		0.79782	0.79358	0.78932	0.78504	0.78073	
Tensión superf (N/m)		0.02322			0.02197		0.01989
Viscosidad (mPa s)	1.786				1.074		0.694
<b>Etanol (50% masa)</b>							
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )		0.92159	0.91773	0.91381	0.90982	0.90577	
Tensión superf (N/M)				0.02851	0.02796	0.02753	0.02578
Viscosidad (mPa s)			3.288	2.813	2.338	1.863	

**Fuente:** Haynes W.M (Editor), Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press, 2012.  
Versión on-line en <http://www.hbcnetbase.com/>

Nota: se ha utilizado un punto para marcar los decimales.