

# PRÁCTICA 4: MEDIDA DE VISCOSIDADES Y DENSIDADES

## FUNDAMENTO TEÓRICO

El estudio de los fluidos en movimiento es un problema complejo y en el que la viscosidad juega siempre un papel fundamental, aunque las teorías más elementales ignoran sus efectos, suponiendo que el líquido se puede dividir en capas se deslizan unas sobre las otras sin encontrar ninguna resistencia. En realidad esto dista mucho de ser verdad, y en el movimiento se desarrollan unas fuerzas tangenciales tan grandes que algunas veces éste se lleva a cabo con gran dificultad. Esto sucede por ejemplo con aceites muy pesados. Por el contrario, otras veces estas fuerzas son muy pequeñas y el líquido fluye entonces fácilmente como sucede con el agua o el alcohol. Este “grado de fluidez” se caracteriza por un coeficiente típico de cada sustancia que se llama coeficiente de viscosidad o viscosidad dinámica. Un sólido amorfo no es en realidad más que un líquido cuya viscosidad dinámica es enormemente grande.

Fue Newton el que dio la expresión de la fuerza de viscosidad: “La fuerza tangencial que una capa ejerce sobre la contigua es proporcional al área de la superficie de contacto y al gradiente de la velocidad normal a la dirección de deslizamiento”.

$$F = \frac{dv}{dz} S \cdot \eta \quad (1)$$

donde  $\eta$  es el coeficiente de viscosidad. Su unidad en el sistema SI es el *stokes*, aunque es corriente también utilizar la unidad de viscosidad en el antiguo sistema CGS. Esta unidad se llama *poise* (1 stokes = 10 poise). La viscosidad cinemática  $\sigma$  es el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad.

El fundamento de la mayor parte de los viscosímetros que se utilizan en la práctica es la fórmula de Poiseuille (ver el Apéndice), que nos da el *caudal*  $Q$  (volumen de fluido por unidad de tiempo) que atraviesa un capilar de radio  $R$  y longitud  $l$  entre cuyos extremos se ha aplicado una diferencia de presiones  $\Delta p$

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{\pi \Delta p R^4}{8 \eta l} \quad (\text{FÓRMULA DE POISEUILLE})$$

(2)

donde  $\eta$  es la viscosidad del fluido. Esto es

$$\eta = \frac{\pi \Delta p R^4 t}{8 l V}$$

Como R, l, V son constantes para un tubo determinado, haciendo  $K = \pi R^4 / (8 l V)$  se tiene

$$\eta = K \Delta p t \quad (3)$$

Si el líquido fluye únicamente por acción de la gravedad en un tubo situado verticalmente, la presión  $\Delta p$  es la que ejerce la columna de líquido, esto es,  $\Delta p = \rho g h$ , siendo  $\rho$  la densidad del líquido y h la altura de la columna. Por tanto

$$\eta = K \rho g h t$$

y como también h es una constante para un tubo determinado podemos escribir:

$$\eta = K' \rho t \quad (4)$$

El valor de  $K'$  depende por tanto de la geometría de cada viscosímetro en concreto y suele darlo el constructor, aunque puede determinarse utilizando un líquido de viscosidad conocida. Normalmente se determinan las viscosidades relativas referidas al agua. Para el agua se tendrá:

$$\eta_{H_2O} = K' \rho_{H_2O} t$$

Para otro líquido cualquiera:

$$\eta_l = K' \rho_l t'$$

La viscosidad dinámica será:

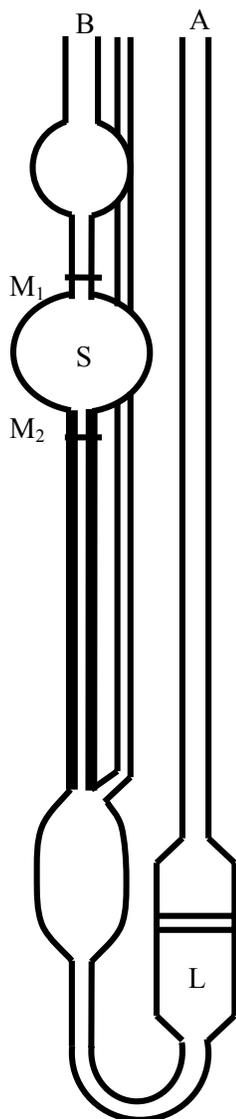
$$\eta_l = \eta_{H_2O} \frac{\rho_l t'}{\rho_{H_2O} t} \quad (5)$$

Así pues, podemos conocer la viscosidad dinámica de un líquido midiendo su densidad y la razón entre los tiempos que tarda en fluir el mismo volumen de líquido y de agua. La viscosidad del agua debe buscarse en las tablas en que aparece su variación con la

temperatura. A continuación se dan los valores de la viscosidad del agua para varias temperaturas. Vamos a considerar 20°C como temperatura ambiente.

$\eta_{\text{H}_2\text{O}}$ (milistokes)	1.793	1.522	1.311	1.142	<b>1.006</b>	0.893	0.800
T (°C)	0	5	10	15	<b>20</b>	25	30

El viscosímetro de Ostwald permite un cálculo rápido (aunque no de máxima precisión) de la viscosidad relativa de un líquido midiendo los tiempos que un mismo volumen de dos líquidos tarda en pasar entre las marca  $M_1$  y  $M_2$  (ver figura 2)



**Figura 1. Viscosímetro de Ostwald**

El viscosímetro de Ostwald está formado por un capilar unido por su parte inferior a una ampolla L y por su parte superior a otra ampolla S. Se llena la ampolla inferior L de agua introduciéndola por A. Se aspira por la rama B hasta que el nivel del agua sobrepase la ampolla superior procurando que no queden burbujas de aire.

Se deja caer el agua y se cuenta el tiempo que tarda en pasar entre los niveles  $M_1$  y  $M_2$ . Se repite esta operación varias veces y se calcula el valor medio de los tiempos,  $t$ .

A continuación se procede de manera análoga con el líquido cuya viscosidad se desea conocer, obteniéndose el valor medio  $t'$ . Una vez obtenidos los tiempos se calcula el valor de la viscosidad dinámica (ecuación 5).

Cuando se comience a trabajar tanto con el líquido como con el agua el viscosímetro debe estar limpio y seco.

## **CUESTIONES DE LA PRÁCTICA 4**

1. Preparar tres disoluciones de 100 ml de azúcar (sacarosa, peso molecular 342.3 g/mol) de aproximadamente 5, 10 y 15 por ciento en peso. Estimamos la cantidad de azúcar necesaria, la preparamos y pesamos, dando finalmente la concentración exacta (utilizando la lectura de la balanza) en molaridad y en tanto por ciento en peso para cada una de las disoluciones. Para pesar el azúcar se van a utilizar las **balanzas de precisión**. Para hacer las disoluciones se enrasará en los **matraces aforados**, disolviendo previamente el azúcar en un vaso de precipitado con una cantidad de agua menor al volumen del matraz aforado que se vaya a utilizar.
2. Calcular la densidad del agua pura y de cada disolución de azúcar pesando 10 ml de cada una de las muestras. Se tomarán los 10 ml con la **pipeta aforada** y se verterán sobre un vaso de precipitado pequeño puesto en la plataforma de la balanza de precisión (“tarar” la escala de la balanza a cero antes de verter sobre el vaso). Con los valores obtenidos de densidad y concentración molar hacer la recta de calibrado ajustando los cuatro puntos a una recta por mínimos cuadrados.
3. Medir la viscosidad dinámica del agua pura y de cada una de las disoluciones con el viscosímetro a temperatura ambiente (20°C). Representar gráficamente la viscosidad dinámica y la viscosidad cinemática frente a la concentración molar de azúcar.
4. Medir la viscosidad dinámica del agua pura a 40 y 50 °C. Para ello se introduce el viscosímetro en el baño termostático y se esperan dos minutos antes de realizar las medidas. Los valores de viscosidad obtenidos se utilizan para ampliar la tabla de viscosidad del agua en función de la temperatura (página 3). Suponer para ello que la densidad del agua no varía entre 30 y 50 °C. Representar todos los valores gráficamente.

5. Tomar muestras de una disolución problema de concentración desconocida (podría provenir de un río o del plasma sanguíneo de un ser vivo, por ejemplo). Realizar las siguientes experiencias:
  - a) Medir la densidad de la muestra problema y utilizar la recta de calibrado (la obtenida mediante mínimos cuadrados) para calcular la concentración de azúcar de dicha muestra.
  - b) Medir la viscosidad dinámica de la muestra problema a temperatura ambiente y utilizar la gráfica de viscosidad frente a concentración para calcular, esta vez por interpolación lineal, la concentración de la muestra. Comparar con el resultado obtenido a partir de la densidad.

## APÉNDICE: DEDUCCIÓN DE LA FÓRMULA DE POISEUILLE

Consideremos un fluido moviéndose en el interior de un cilindro de radio  $R$ . Tomemos el eje del cilindro como eje  $OX$ . Aislemos la capa de fluido comprendida entre dos cilindros de radios  $r$  y  $r+dr$  y longitud  $l$ . El fluido en contacto con el interior del cilindro tiende a acelerar su movimiento mientras que, por el contrario, el fluido en contacto con la superficie del cilindro tiende a retardarlo.

Sean  $F_1$  y  $F_2$  las correspondientes fuerzas de viscosidad. De acuerdo con (1) se tiene:

$$F_1 = -2\pi\eta l \cdot r \cdot \frac{dv}{dr}$$

$$F_2 = 2\pi\eta l \cdot r \cdot \frac{dv}{dr} + \frac{d}{dr} \left( 2\pi\eta l \cdot r \cdot \frac{dv}{dr} \right) dr$$

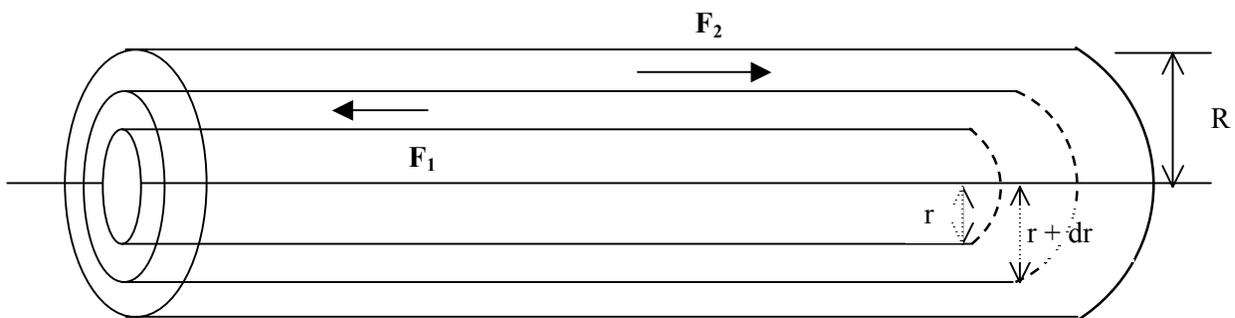


Figura 2

Así pues, la fuerza tangencial sobre la capa vale:

$$F = 2\pi\eta l \frac{d}{dr} \left( r \frac{dv}{dr} \right) dr$$

Si el movimiento es estacionario esta fuerza debe equilibrarse con la fuerza debida a la diferencia de presión existente entre los extremos del tubo. Si llamamos  $p_1$  y  $p_0$  respectivamente a estas presiones se tiene:

$$2\pi\eta l \frac{d}{dr} \left( r \frac{dv}{dr} \right) dr = (p_1 - p_0) 2\pi r dr$$

Integrando queda:

$$2\pi\eta l r \frac{dv}{dr} = (p_1 - p_0) \pi r^2 + C_1$$

Volviendo a integrar:

$$v_0 2\pi\eta l = (p_1 - p_0) \pi r^2 + C_1 \frac{\ln r}{2} + C_2$$

que se puede escribir de la forma:

$$v = \frac{(p_1 - p_0)}{4l\eta} r^2 + C' \frac{\ln r}{2} + C_2$$

$$\text{con } C' = \frac{C_1}{2\pi\eta l}$$

Para determinar  $C'$  y  $C_2$  aplicaremos las condiciones en los límites. La velocidad de la capa que está en contacto con la pared es cero, de forma que  $v$  es cero cuando  $r = R$ . Cuando  $r = 0$  la velocidad es máxima. Por consiguiente:

$$C' = 0 \quad ; \quad C_2 = -\frac{(p_1 - p_0)}{4l\eta} R^2$$

y por tanto,

$$v = \frac{(p_1 - p_0)}{4l\eta} (R^2 - r^2)$$

El volumen del fluido que atraviesa cualquier superficie transversal del cilindro en la unidad de tiempo es:

$$\frac{V}{t} = \int_0^R 2\pi r v dr = \frac{\pi \cdot (p_0 - p_1) R^4}{8\eta l}$$

FÓRMULA DE POISEUILLE

# PRÁCTICA 5: CALORIMETRÍA

## FUNDAMENTO TEÓRICO

Al mezclar dos cantidades de líquidos a distinta temperatura se genera una transferencia de energía en forma de calor desde el más caliente al más frío. Dicho tránsito de energía se mantiene hasta que se igualan las temperaturas, cuando se dice que ha alcanzado el equilibrio térmico.

La cantidad de calor  $Q$  que se transfiere desde el líquido caliente, o la que absorbe el frío, responde a la expresión

$$Q = mC_e \Delta T$$

donde  $m$  es la masa del líquido,  $C_e$  su calor específico y  $\Delta T$  la variación de temperatura que experimentan.

## 1. MEDIDA DE LA CAPACIDAD CALORÍFICA DE UN CALORÍMETRO

Las transferencias de calor se miden en un calorímetro a través de variaciones de temperatura. Previo a toda experiencia es necesario *calibrarlo*, esto es, determinar su capacidad calorífica.

Para realizar el calibrado, se mezclan cierta cantidad de agua fría con agua caliente y se mide la temperatura de equilibrio. Durante este proceso una parte de la energía cedida por el agua caliente es absorbida por el vaso Dewar del calorímetro que eleva su temperatura desde  $T_2$  a  $T_e$ . En consecuencia, como en el calorímetro no se producen pérdidas de energía

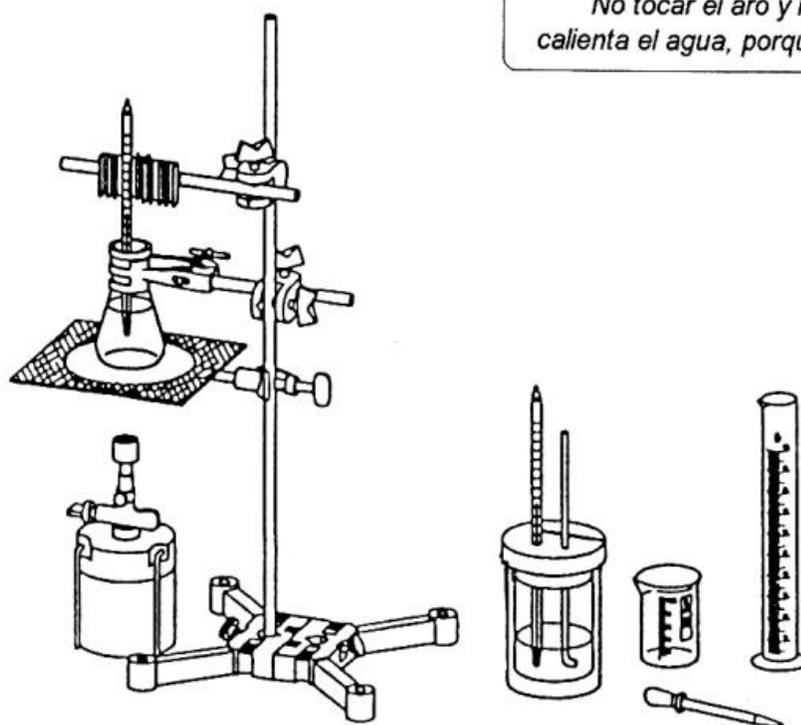
hacia el exterior, la variación del conjunto formado por el calorímetro y las cantidades de agua será nula, por lo que se puede escribir

$$m_1(T_e - T_1) + C_K(T_e - T_2) + m_2(T_e - T_2) = 0 \quad (1)$$

donde  $C_K$  es la capacidad calorífica del calorímetro, esto es, cuánto calor absorbe por grado de aumento en la temperatura. Además se ha tomado el calor específico del agua como  $1 \text{ cal.g}^{-1}\text{K}^{-1}$

La influencia del calorímetro también se acostumbra a identificar como equivalente en agua ( $K$ ), que se define como la cantidad de agua cuya capacidad calorífica es  $C_K$ . Por ser el calor específico del agua  $1 \text{ cal.g}^{-1}\text{K}^{-1}$ , el equivalente en agua es la capacidad calorífica del calorímetro pero expresada en gramos.

### Diseño experimental y recogida de datos



**PRECAUCION:**  
*No tocar el aro y la rejilla cuando se calienta el agua, porque están muy calientes*

La figura ilustra el montaje que debe disponerse para realizar esta práctica. Echense 200ml de agua del grifo, medidos cuidadosamente con la probeta en el calorímetro y tápese

colocando el termómetro y el agitador. Al cabo de cierto tiempo anótese su temperatura ( $T_2$ ).

Echense por otra parte 200 ml de agua, también medidos con la probeta, en el erlenmeyer que se sujetará al soporte mediante la pinza y la varilla. En él se introduce un termómetro suspendido de la placa soporte sin que llegue a tocar el fondo del vaso. Se calienta este agua hasta alcanzar unos  $40^{\circ}\text{C}$ , y a continuación se vierte en el calorímetro, procurando anotar su temperatura ( $T_1$ ) justo antes de introducirse en el mismo. Una vez ambas porciones de agua se encuentran en el calorímetro, se agita ligeramente y se lee la temperatura de equilibrio  $T_e$  al cabo de un minuto (o el tiempo requerido para que la lectura del termómetro se mantenga estable). En la medida de lo posible *inténtese apreciar hasta la mitad de grado en la lectura de las temperaturas.*

Se propone realizar dos experiencias semejantes utilizando en cada una de ellas diferentes cantidades de agua caliente y fría.

1. Masa de agua fría =  $m_2 = 200$  g + masa de agua caliente =  $m_a = 200$  g
2. Masa de agua fría =  $m_2 = 150$  g + masa de agua caliente =  $m_a = 150$  g

Los datos de ambas experiencias se trasladan a la tabla siguiente:

Temperaturas en $^{\circ}\text{C}$	$T_1$	$T_2$	$T_e$
Caso 1			
Caso 2			

## Resultados y conclusiones.

Efectuando los cálculos que se derivan de la expresión (1), se determina el valor de la capacidad calorífica  $C_K$  y del equivalente en agua  $K$  en ambos casos. La capacidad calorífica del calorímetro se asigna al valor medio de los dos valores encontrados. Igualmente se hace con el equivalente en agua.

Expresar los resultados en calorías y en unidades del Sistema Internacional, sabiendo que  $1\text{cal} = 4,185$  J.

Los valores que se obtienen para  $C_K$  y  $K$ , ¿dependen de la cantidad de líquido que se utiliza en la experiencia?

## 2. MEDIDA DEL CALOR LATENTE DE FUSIÓN DEL HIELO

El calor latente de fusión  $L_F$  se define como la cantidad de calor por unidad de masa necesaria para fundir un sólido que coexiste con el líquido a la temperatura de fusión. Por

lo tanto, la energía total en forma de calor  $Q_F$  necesaria para fundir una masa  $M$  de hielo se encuentra en agua a la temperatura de  $0^\circ\text{C}$  vendrá dada por:

$$Q_F = L_F \cdot M$$

El valor experimental aceptado para el calor latente de fusión del hielo es  $L_F = 80 \text{ cal/g} = 3.34 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$ .

Al realizar la medida experimental de  $L_F$  debemos asegurarnos de que el hielo se encuentre precisamente a  $0^\circ\text{C}$ , por lo que si el hielo se saca de un congelador se deberá dejarlo alcanzar la coexistencia con el agua.

## Procedimiento Experimental

Se calientan en un matraz unos 200 ml de agua hasta unos  $30^\circ\text{C}$ , que controlaremos con un termómetro. De esta agua templada se toman exactamente  $V_1=150\text{ml}$  medidos en una probeta enrasando con un cuentagotas. Esta cantidad de agua  $M_1=150\text{g}$  se decantan en el calorímetro, midiéndose al cabo de unos minutos la temperatura de equilibrio  $T_1$  de agua y calorímetro.

Por otra parte se toma una cantidad de hielo picado o, en su defecto, varios cubitos de hielo que se trocean envolviéndolos con un paño y golpeándolos contra el suelo, procurando que esté lo más seco posible antes de echarlo en el calorímetro. La masa de hielo  $M_2$  se medirá posteriormente una vez fundido a partir del incremento del volumen total del agua en el calorímetro. Seguidamente se agita el calorímetro y al cabo de unos minutos se anota la temperatura  $T_E$  del equilibrio, que deberá ser necesariamente superior a  $0^\circ\text{C}$ ; de lo contrario se deberá repetir la experiencia con menor cantidad de hielo. Es conveniente aproximar las medidas de las temperaturas hasta medio grado, aunque, en rigor la escala sólo permita lecturas de unidades de grado.

## Recogida de Datos

El volumen de agua procedente del hielo fundido  $V_2$  se obtiene midiendo el volumen total de agua en el calorímetro  $V_A$  h, de manera que  $V_2 = V_A - V_1$ . La masa  $M_2$  de hielo vendrá entonces dada por  $m_2 = V_2 \cdot \rho$ , tomando  $\rho = 1.0 \text{ g/ml}$ , para la densidad del agua a temperatura ambiente.

Construir una tabla con los valores todos los datos experimentales: volumen, masa y temperatura iniciales del agua templada ( $V_1, m_1, T_1$ ) y del hielo fundido ( $V_2, m_2, T_2=0^\circ\text{C}$ ), y temperatura de equilibrio  $T_E$ .

## Cálculos

El cálculo de  $L_F = Q_F / m_2$  se lleva a cabo utilizando la expresión calorimétrica:

$$m_1 \cdot C_e \cdot (T_E - T_1) + C_K \cdot (T_E - T_1) + Q_F + m_2 \cdot C_e \cdot (T_E - T_2) = 0 \quad (2)$$

siendo  $C_e = 1.0 \text{ cal/(g } ^\circ\text{C)}$  y  $C_K$  la capacidad calorífica del calorímetro, obtenida en la primera parte de la práctica.

Expresar el valor obtenido para  $L_F$  en unidades del Sistema Internacional. Comparar dicho valor con el valor experimental aceptado para el calor de fusión del hielo dado más arriba. Repasa el procedimiento experimental que has seguido y discute cuáles son en tu opinión las mayores fuentes de incertidumbre al realizar las medidas.

## **2. MEDIDA DEL CALOR LATENTE DE VAPORIZACIÓN DEL AGUA**

En el cambio de estado líquido-vapor que se pone de manifiesto en la ebullición del agua, la energía del foco calorífico que se transfiere a las moléculas de agua hace que estas adquieran una gran energía cinética. Este aumento de energía hace que algunas moléculas sean capaces de vencer las fuerzas intermoleculares de la superficie del líquido que tienden a retenerlas y pasen a la fase vapor.

La temperatura a que se produce este fenómeno recibe el nombre de *temperatura de ebullición* y se mantiene invariable aunque se aporte más energía al líquido. Si se continúa calentando, toda la energía adicional irá a evaporar más moléculas hasta que todas ellas hayan pasado a la fase gaseosa y solo entonces, empezará a calentarse el vapor resultante. Cuando la presión es de 1 atm (760 mm Hg), la temperatura de ebullición es de  $100 \text{ } ^\circ\text{C}$ , siendo menor cuanto menor es la presión atmosférica.

Para transformar  $m$  gramos de agua a  $100 \text{ } ^\circ\text{C}$  en  $m$  gramos de vapor también a  $100 \text{ } ^\circ\text{C}$  se precisa una cantidad de energía en forma de calor  $Q_V$ . El calor de vaporización  $L_V$ , es la cantidad de calor necesaria para que se evapore 1 g de agua. Por lo tanto puede determinarse como:

$$L_V = \frac{Q_V}{m}$$

El valor de  $L_V$  establecido experimentalmente es  $540 \text{ cal / g}$ , ó  $2.26 \cdot 10^6 \text{ J / kg}$ .

### **Procedimiento experimental**

Los materiales que se utilizan en esta práctica deben disponerse como en la figura adjunta. Se comienza midiendo en la probeta con exactitud un volumen de agua  $V_1=100 \text{ ml}$ , que se echan en el Erlenmeyer. A continuación se coloca el termómetro de manera que el bulbo quede situado dentro del agua y se enciende el mechero Bunsen. Es importante no modificar la llama del mechero durante toda la experiencia.

Cuando el agua alcanza  $30 \text{ } ^\circ\text{C}$ , se mide el tiempo de tarda en alcanzar los  $70 \text{ } ^\circ\text{C}$ , dato que se utilizará después para determinar la potencia calorífica,  $P$ , del mechero. Además del tiempo

total, se anotarán los tiempos parciales a 40 °C, 50 °C y 60 °C, con el fin de construir la curva de calentamiento del mechero.

En el momento en que el agua tiende a hervir, se mantiene así durante 10 minutos y se apaga el mechero. Transcurridos unos minutos y con cuidado, se afloja la nuez que sujeta la pinza y utilizando ésta como asa del Erlenmeyer se echa el agua caliente en la probeta, midiendo el volumen  $V$ , a partir del cual podemos conocer la parte que se evaporó,  $V_2$  ( $V_2 = V_1 - V$ ). Suponiendo que la densidad del agua es  $1 \text{ g/cm}^3$ , tendremos así también la masa de agua evaporada,  $m_2$ .

## Cálculos

El calor invertido en calentar el agua es:

$$Q = m_1 C_e \Delta T \quad (3)$$

donde  $C_e$  es la capacidad calorífica del agua,  $C_e = 1.0 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$ . Por lo tanto, la potencia calorífica del mechero,  $P$ , se puede calcular como

$$P = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{m_1 C_e \Delta T}{\Delta t} \quad (4)$$

Donde  $\Delta t$  es el tiempo que se tarda en calentar el agua desde  $30^\circ \text{C}$  a  $70^\circ \text{C}$ , expresado en segundos, y  $\Delta T$  es el incremento de temperatura entre esos dos valores, es decir,  $40^\circ \text{C}$ . Sus unidades son cal/s. Con ese valor de  $P$ , se obtiene  $L_V$  mediante la expresión:

$$L_V = \frac{600P}{m_2} \text{ (cal/g)} \quad (5)$$

Donde 600 es el número de segundos correspondientes a los 10 minutos que hemos calentado después de que el agua haya entrado en ebullición.

Comparar el resultado obtenido con el experimental dado anteriormente y comentar cuáles son las posibles fuentes de error que expliquen las posibles discrepancias