



# PROPIEDADES TÉRMICAS DEL AGUA Y SUS CAMBIOS DE FASE

## Objetivo

1. Estudiar experimentalmente diversas propiedades térmicas del agua pura (realmente agua del grifo) y del agua de mar (realmente agua del grifo con 35 g/kg NaCl).
2. Estudiar diferentes procesos de cambio de fase, en sustancias puras y en mezclas.
3. Conocer el comportamiento anómalo del agua, y la influencia de la salinidad.
4. Aunque todas las propiedades de equilibrio están incluidas en  $\rho(T,p)$  y  $c_p(T,p_0)$ , se estudian aparte.

## Actividades

1. Densidades. Medida de densidades de agua pura, de agua salada y de hielo (la del vapor es muy difícil), a distintas temperaturas y por distintos procedimientos: con densímetro (Principio de Arquímedes), y por pesada volumétrica,  $\rho=m/V$ . Determinar el coeficiente de dilatación por variación de densidad y por variación de volumen en tubo con capilar. Las pequeñísimas variaciones de densidad del agua pura cerca de 4 °C se detectarán por otro procedimiento (la estratificación térmica se hace inestable por debajo de 4 °C).
2. Puntos de cambio de fase. Estudiar experimentalmente la temperatura de congelación de agua pura y de agua de mar, enfriándolas en tubo de ensayo por inmersión en mezcla hielo-sal (añadir 20 g de sal a 40 g de hielo picado). Efecto de la velocidad (poniendo algo de aislante) en las curvas de enfriamiento ( $T-t$ ). La temperatura de ebullición se ve aparte.
3. Presión de vapor. (La vaporización del agua a baja temperatura en campana de vacío ya se hizo en otra práctica.) Determinar la presión de vapor del agua a distintas temperaturas en un tubo de ensayo invertido encerrando aire húmedo, midiendo la variación del volumen con la temperatura del aire atrapado, y calcular con ello una entalpía de vaporización media.
4. Entalpía de cambio de fase. Determinar la entalpía de vaporización del agua en un destilador; medida de potencias y caudales; balance energético del destilador.

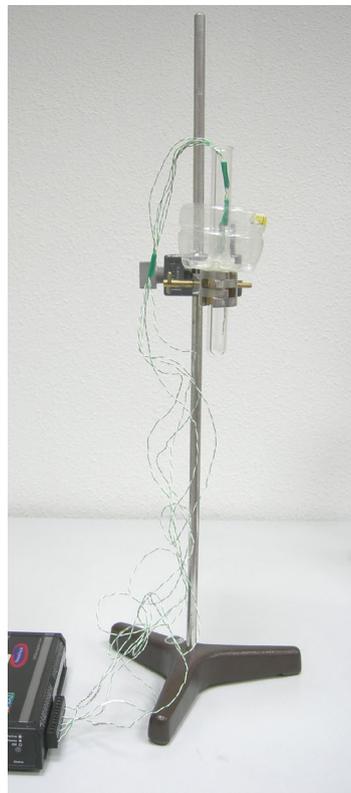
$$\Delta E = W + Q + \sum_{\text{tiempo}}^{\text{aberturas}} \int h_{t,e} dm_e$$

5. Conductividad térmica. (No se va a hacer porque es muy difícil; hay que evitar la convección en el fluido; y para la del hielo trabajar bajo cero).
6. Evaluación de la incertidumbre de los resultados obtenidos.

# Equipos



Fig. 1. Montajes de la práctica.



(a)



(b)

Fig. 2. a) comportamiento anómalo del agua, b) densímetro.

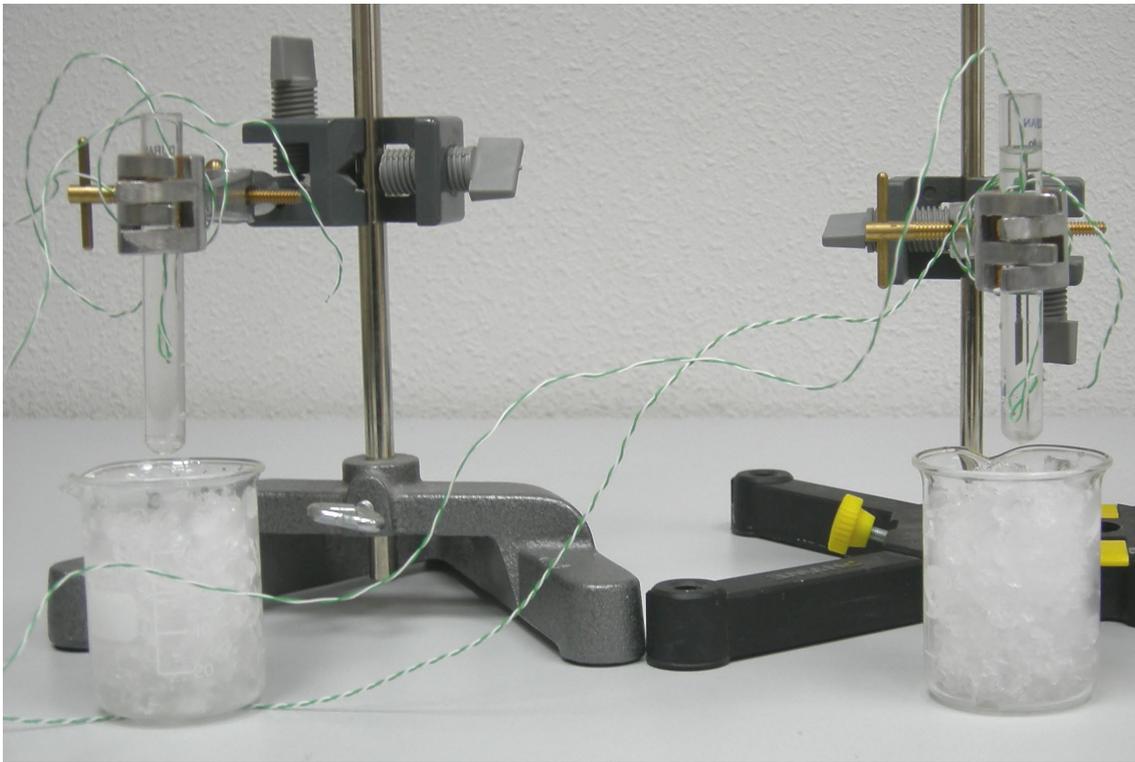


Fig. 3. Congelación de agua dulce y salada.

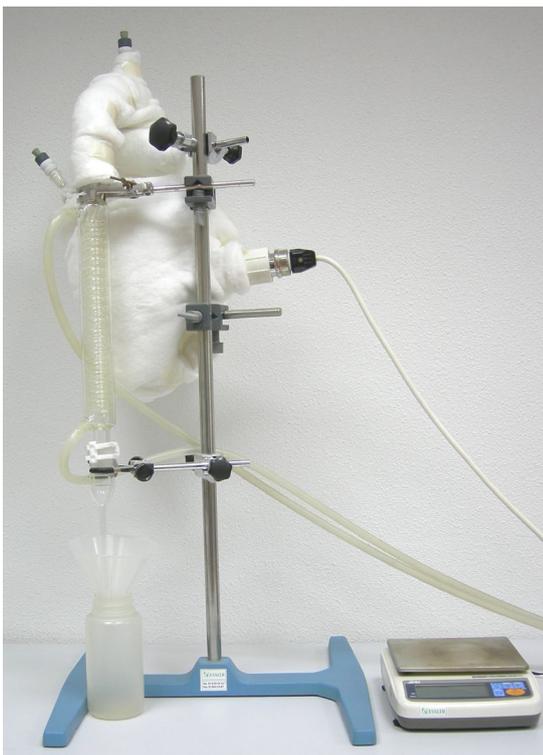


Fig. 4. Entalpía de vaporización en destilador.

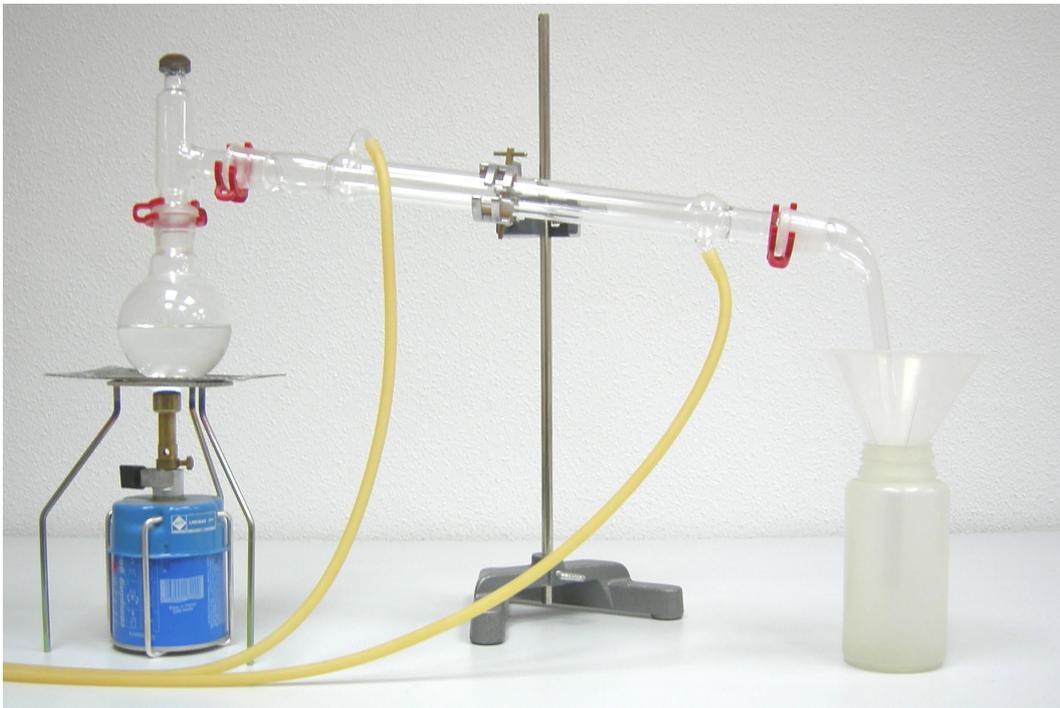


Fig. 5. Destilador.

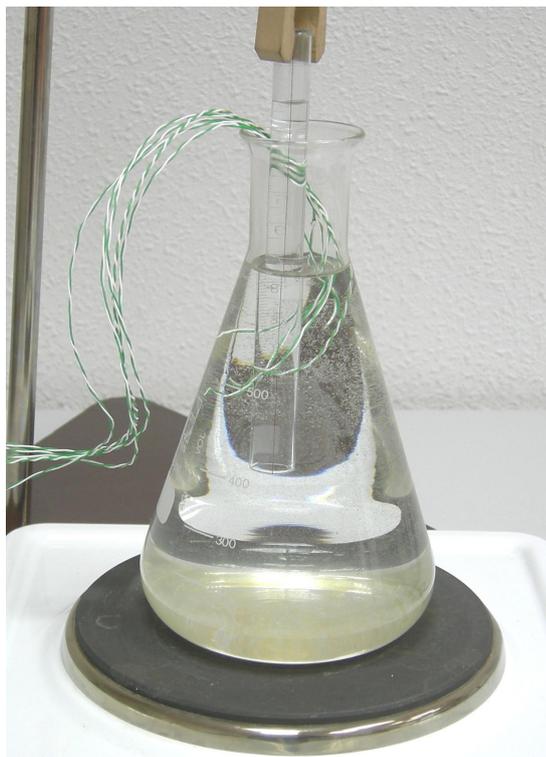


Fig. 6. Presión de vapor del agua.

## Desarrollo

### Presión de vapor del agua y entalpía de vaporización

Para el gas atrapado, en todo instante (ley del gas ideal):

$$pV=(n_a+n_v)R_uT \quad (1)$$

Si hay equilibrio bifásico, se verificará en todo instante (ley de Raoult):

$$x_v = \frac{p^*(T)}{p} \quad (2)$$

siendo  $p^*$  la presión de equilibrio bifásico del agua pura a esa temperatura. La presión en el gas será prácticamente la atmosférica, ya que  $p=p_0+\rho_w g \Delta z$ , que se mira en un barómetro y suele ser en Madrid:

$$p \approx p_0=94 \text{ kPa} \quad (3)$$

En una primera aproximación, incluso la temperatura del gas se puede considerar que varía poco (e.g. de 290 K a 370 K es menos del 30%), y con  $V=zA$ , sería:

$$\frac{p_0 A z_2}{p_0 A z_1} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{n_a + n_{v2}}{n_a + n_{v1}} \frac{R_u T_0}{R_u T_0} = \frac{n_a + n_{v2}}{n_a + n_{v1}} = \frac{1 - x_{v1}}{1 - x_{v2}} = \frac{p_0 - p_1^*}{p_0 - p_2^*} \quad (4)$$

que también se podría haber deducido razonando con presiones parciales  $(p_0 - p^*)Az = n_a R_u T$ . Si se retiene el efecto de la temperatura:

$$\frac{z_2}{z_1} = \frac{n_a + n_{v2}}{n_a + n_{v1}} \frac{T_2}{T_1} = \frac{p_0 - p_1^*}{p_0 - p_2^*} \frac{T_2}{T_1} \quad (5)$$

Si se desprecia la  $p^*$  a baja temperatura (e.g.  $p^*(15 \text{ °C})=1,3 \text{ kPa}$ ), a alta temperatura será:

$$p^*(T) = p_0 \left( 1 - \frac{z_0}{z} \frac{T}{T_0} \right) \quad (6)$$

siendo  $z_0$  y  $T_0$  la posición del menisco y la temperatura iniciales. Y de la ecuación de Clapeyron se puede despejar la **entalpía de cambio de fase**,  $h_{lv}$ , con  $R = 462 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ :

$$\ln \frac{p^*(T_2)}{p^*(T_1)} = \frac{-h_{lv}}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (7)$$

[Back to lab](#)