

Escalfament i canvi d'estat de l'aigua

Material per al professorat

Orientacions didàctiques

Temporització

- 3/4 hora per a l'experimentació
- 1 hora per a respondre el qüestionari
- 1/2 hora per a l'ampliació

Alumnes als quals s'adreça l'experiència

Alumnes de 1er de batxillerat

Orientacions metodològiques

- És convenient comentar amb els alumnes que l'augment de temperatura de l'aigua és proporcional al temps d'escalfament, és a dir, a la quantitat d'energia elèctrica subministrada, però inversament proporcional a la massa d'aigua que s'escalfa. Si s'escalfés una massa d'aigua doble amb les mateixes condicions de l'experiència, el temps necessari per arribar a bullir l'aigua seria el doble. Si es disposa de temps es pot comprovar amb masses d'aigua diferents.
- Quan el líquid arriba a bullir la seva temperatura ja no augmenta més. És convenient relacionar aquest fet amb els estats d'agregació i les forces d'atracció entre les molècules, i destacar els aspectes energètics, especialment en què s'inverteix l'energia que s'està subministrant.
- Els resultats que poden obtenir els alumnes calculant el capacitat calorífica específica i la calor de vaporització a partir de l'augment total de la temperatura de l'aigua no són bons, ja que hi ha una vaporització considerable bastant abans que l'aigua comenci a bullir i, a més, costa definir quan comença a bullir el líquid. Per garantir que l'energia subministrada s'utilitza només en augmentar la temperatura, i obtenir millors resultats, s'ha de calcular el capacitat calorífica específica en una zona del gràfic on l'evaporació no és significativa, que coincideix amb l'inici de l'escalfament. La corba només és lineal en el primer tram, on es pot trobar la funció lineal aproximada.
- És important destacar que a partir de 80°C l'evaporació de l'aigua és considerable, per tant, l'energia subministrada provoca un menor escalfament quan la temperatura és alta, ja que una part s'inverteix a vaporitzar l'aigua. Al gràfic això significa un pendent molt més suau quan la temperatura s'acosta al punt d'ebullició, i per això costa determinar amb exactitud aquest punt.
- Resulta interessant comparar la calor necessària per escalfar l'aigua fins a la temperatura d'ebullició i la calor necessària per aconseguir que s'evapori. El darrer valor és molt més gran que el primer.
- Per mantenir uniforme l'augment de temperatura de l'aigua durant l'escalfament, és important agitar suaument i constantment el líquid.

- És important per al resultat de l'experiència, desendollar la resistència en el moment de finalitzar la captació.
- Cal destacar la influència del vas, el termòmetre i la vareta en els resultats de l'experiència. Quan més gran sigui el vas i menys quantitat d'aigua s'hi posi, major serà la influència, ja que la capacitat calorífica específica de l'aigua és molt més gran que la del vidre o la dels metalls.

Orientacions tècniques

- El sensor de temperatura ve calibrat de fàbrica, no cal tornar-lo a calibrar per a aquesta experiència. En cas necessari, en el manual de l'equip trobareu la forma de calibrar-lo.
- De fet, no és imprescindible aïllar el vas, perquè el vidre i l'aire no són bons conductors, però per seguretat, és millor fer l'experiència posant el vas de precipitats dintre del recipient de *porexpan*, perquè li dona estabilitat i evita possibles cremades als alumnes durant l'escalfament. Si no s'utilitza recipient aïllant, és millor utilitzar un vas més gran (500 mL) per tal d'augmentar l'estabilitat. Per aconseguir una ebullició regular és convenient afegir a l'aigua uns trossets de porcellana porosa.
- La capacitat calorífica específica de l'aigua és $4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ i la calor molar de vaporització és $40,6 \text{ kJ.mol}^{-1}$.
- La potència que s'indica a la resistència calefactora sol tenir un error important. En conseqüència, els resultats de c_e i de L són erronis. S'hauria de determinar el valor de la potència exacta abans de fer l'experiència i donar aquest valor als alumnes perquè realitzin els càlculs.

Per obtenir el valor exacte, s'hauria de mesurar la intensitat que circula connectada a un voltatge de 220 V (mentre la resistència estigui endollada, ha d'estar submergida en aigua per tal d'evitar que la calor dissipada la cremi)

La potència de la resistència es calcula amb l'equació:

$$P = V_e \cdot I_e$$

Els resultats obtinguts amb la resistència utilitzada a l'experiència, d'una potència aproximada de 325 W, van ser els següents:

Per a la tensió eficaç de 220 V, la intensitat eficaç és: $I_e = 1,3 \text{ A}$, per tant:

$$P = 220 \text{ V} \cdot 1,3 \text{ A} = 286 \text{ W}$$

Resultats esperats

El gràfic mostra la variació de la temperatura de 200 mL d'aigua al llarg del temps, mentre s'escalfa amb una resistència calefactora de potència 286 W, en un vas de 250 mL dintre d'un recipient aïllant de *porexpan* sense tapa.

Temperatura inicial: $T_o = 17,2^\circ\text{C}$

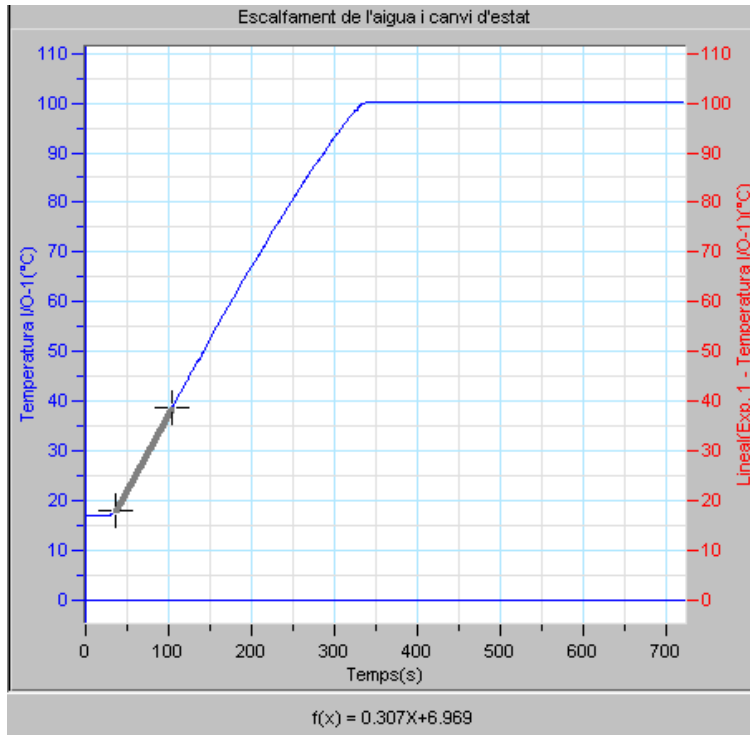
Temperatura d'ebullició: $T_e = 100,2^\circ\text{C}$

Increment de temperatura: $\Delta T = 83,0^\circ\text{C}$

Interval de temps, aproximat, d'augment de temperatura: $\Delta t_1 = 313 \text{ s}$

Interval de temps, aproximat, d'ebullició: $\Delta t_2 = 384 \text{ s}$

Quantitat d'aigua evaporada: $m(\text{H}_2\text{O}) = 54 \text{ g}$; $n(\text{H}_2\text{O}) = 3,0 \text{ mol}$
 Energia total subministrada: $E = 697 \text{ s} \cdot 286 \text{ W} = 198.342 \text{ J}$



Si es calcula la capacitat calorífica específica prenent tot l'interval de temps en què l'aigua ha augmentat la temperatura, el resultat és més alt que el valor correcte, ja que no es té en compte la vaporització de l'aigua, que és molt apreciable a partir de 80°C.

L'error en la capacitat calorífica específica provoca l'inevitable error en la calor molar de vaporització.

Per obtenir millors resultats, s'ha de calcular la capacitat calorífica específica de l'aigua en una zona del gràfic on l'evaporació no sigui apreciable, en la zona de major pendent, tram inicial, tal com s'indica a la gràfica.

Determinació de la capacitat calorífica específica de l'aigua

Una forma senzilla de determinar la capacitat calorífica específica és determinar la variació de temperatura, ΔT , que correspon a una interval de temps, Δt , en un tram al principi de l'escalfament, i aplicar l'equació: $c_e = E / m \Delta T = P \cdot \Delta t / m \Delta T$

És més precís trobar la funció lineal aproximada en aquest tram $T = f(t)$

L'equació de la temperatura en funció del temps per al tram seleccionat tal com es mostra a la gràfica és: $T = 0,307 t + 6,969$

$$P t = m c_e \cdot (T - T_0); P t = m c_e \cdot T - m c_e T_0; T = (P / m c_e) t + T_0; T = k t + T_0$$

El pendent de la recta aproximada en aquest tram és igual a $(P / m c_e)$

Es pot trobar a partir del valor del pendent, la capacitat calorífica específica:

$$c_e = 286 / (0,307 \times 0,20) = 4,6 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Determinació de la calor molar de vaporització

Per determinar la calor molar de vaporització, es considera l'energia total subministrada per la resistència durant tot l'interval de temps, Δt , tant per augmentar la temperatura com per bullir l'aigua.

$$P \Delta t = m_1 c_e \Delta T + L n$$

Substituint les dades de la potència de la resistència, P ; l'augment de temperatura, ΔT ; i els mols d'aigua vaporitzats es calcula el valor de L :

$$286 \times 697 = 0,2 \times 4,6 \times 10^3 \times 83,0 + L \times 3,0$$

$$L = 40,7 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Si s'utilitza el valor calculat de l'equivalent en aigua del conjunt (vas, sensor i vareta) els resultats de la capacitat calorífica específica de l'aigua i la calor molar de vaporització són:

$$c_e = P / k (m + m_e) = 286 / (0.307 \times 0,22) = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$L = 286 \times 697 - 0,22 \times 4,2 \times 10^3 \times 80,0 / 3,0 = 40,7 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Respostes al qüestionari

1. El pendent de la línia es va fent més suau quan es va aproximant a la temperatura d'ebullició, perquè l'evaporació de l'aigua en augmentar la temperatura és cada vegada més gran. L'energia subministrada per la resistència calefactors s'inverteix part a augmentar la temperatura i part en l'evaporació, i, en conseqüència, l'augment de la temperatura és proporcionalment inferior.

Quan la temperatura de l'aigua és pràcticament la d'ebullició, la major part de l'energia l'utilitzen les molècules per escapar del líquid, i només una petita part s'inverteix per augmentar la temperatura, per això és difícil determinar la temperatura d'ebullició.

2. A partir dels 80 °C l'evaporació de l'aigua és considerable.
3. L'energia per escalfar l'aigua des de temperatura ambient fins a la T_e és molt inferior a l'energia necessària per a la vaporització completa.

Energia, E_1 , per augmentar la temperatura de l'aigua fins a la T_e .

$$E_1 = 0,2 \text{ kg} \times 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{Kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \times (100 - 25) \text{ K} = 62,7 \text{ kJ}$$

Energia, E_2 , necessària per a la vaporització,

$$E_2 = 40,6 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \times 11,1 \text{ mol} = 451 \text{ kJ}$$

L'energia necessària per a la vaporització és més de 7 vegades superior.

4. Si es pren tot l'interval, hi ha una vaporització considerable bastant abans que l'aigua comenci a bullir, i, a més, costa definir quan comença a bullir el líquid.

És millor calcular la capacitat calorífica en un tram on la vaporització no sigui significativa que és el tram inicial, on la línia té major pendent.

5. L'augment de temperatura és inversament proporcional a la massa de líquid. Si la massa de líquid és la meitat, el temps d'escalfament serà la meitat
6. Si la capacitat calorífica específica del líquid és la meitat, la corba tindrà major pendent, s'escalfarà més ràpidament. En ser la temperatura d'ebullició el doble, per arribar a la T_e trigarà el mateix temps que l'aigua.
7. $\eta = \text{Energia transferida a l'aigua} / \text{Energia elèctrica utilitzada}$

$$\begin{aligned} \text{Energia transferida a l'aigua} &= m_1 c_e \Delta T + n L = \\ &= 0,18 \times 4,18 \times 10^3 \times 79,3 + 2,7 \times 40,6 \times 10^3 \\ &= 169,3 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$\text{Energia elèctrica utilitzada} = P \Delta t = 286 \text{ W} \times 697 \text{ s} = 199,3 \text{ kJ}$$

$$\eta = (169,3 / 199,3) = 0,85$$

8. En escalfar un líquid, l'energia subministrada s'utilitza per augmentar la velocitat de les partícules, augmenta l'energia cinètica mitjana i augmenta, per tant, la temperatura. Quan el líquid arriba a la temperatura d'ebullició, l'agitació tèrmica de les partícules és tal que aconseguix vèncer les forces d'atracció entre elles. La separació de les partícules requereix energia. Mentre dura l'ebullició tota l'energia subministrada s'utilitza només per separar les partícules, i per això la temperatura es manté constant.
9. Com que l'aigua té una capacitat calorífica específica molt més elevada que el vidre i els metalls, la influència del vas, el sensor i la vareta és més apreciable com més gran sigui la relació entre la capacitat del vas i la massa d'aigua que s'escalfa.
10. Les fonts d'error en aquesta experiència són:
 - La massa d'aigua va disminuint durant l'escalfament i en major quantitat quan es va acostant a la temperatura d'ebullició.
 - L'energia subministrada per la resistència durant l'ebullició és inferior a l'energia necessària per vaporitzar la variació de massa, perquè part ja s'havia vaporitzat abans (durant l'escalfament).
 - La potència que s'indica a la resistència calefactora és aproximada, caldria determinar el valor exacte.
 - Part de l'energia subministrada per la resistència és absorbida pel vas, la sonda i la vareta. S'hauria de determinar l'equivalent en aigua del conjunt.

Suggeriment d'ampliació

Es podria determinar l'equivalent en aigua del conjunt (vas, sensor i vareta), m_e , de la manera següent:

- Es posa dintre del vas aïllant, el vas de precipitats amb un volum d'aigua de 100 mL (0,1 kg) juntament amb el sensor i la vareta. S'anota la temperatura, T_1 .
- A part, s'escalfa el mateix volum d'aigua fins a uns 50°C. Es mesura la temperatura de l'aigua calenta, T_2 .
- S'afegeix l'aigua calenta a la freda del vas, s'agita fort amb la vareta i es determina la màxima temperatura, T , assolida pel conjunt.

Part de la calor cedida per l'aigua calenta s'utilitza en escalfar l'aigua freda i la resta per escalfar el vas, el sensor i la vareta.

La calor cedida per l'aigua calenta, Q_2 , és: $Q_2 = m c_e (T - T_2)$

La calor absorbida per l'aigua freda, Q_1 , és: $Q_1 = m c_e (T - T_1)$

La calor absorbida pel conjunt, Q_{conjunt} , és: $Q_{\text{conjunt}} = m_e c_e (T - T_1)$

Com que $Q_1 + Q_2 + Q_{\text{conjunt}} = Q_1 + Q_2 + m_e c_e (T - T_1) = 0$

es pot determinar la massa d'aigua equivalent, m_e , que hauria absorbit la mateixa quantitat de calor que el conjunt del vas, sensor i vareta.

En l'experiència realitzada amb un vas de precipitats Pirex de 250 mL, els resultats van ser els següents:

La temperatura de l'aigua calenta, $T_2 = 48,0$ °C

La temperatura de l'aigua freda del vas de precipitats, $T_1 = 26,0$ °C

La temperatura màxima assolida per la barreja, $T = 36,0$ °C

$$Q_2 = 0,1 \times 4,18 \cdot 10^3 \times (36,0 - 48,0) = - 5.016 \text{ J}$$

$$Q_1 = 0,1 \times 4,18 \times 10^3 \times (36,0 - 26,0) = 4.180 \text{ J}$$

$$Q_1 + Q_2 + m_e c_e (T - T_1) = -5.016 + 4.180 + m_e \times 4,18 \times 10^3 \times (36,0 - 26,0) = 0$$

$$m_e = 0,020 \text{ kg}$$

Experiment adaptat al Multilab per A. Aparicio i M. T. Lozano de l'experiment del mateix nom realitzat per A. Cortel per a l'equip SADEX.