

## ENFRIAMIENTO DE AGUA MEDIANTE EL USO DE AIRE LÍQUIDO

### WATER COOLING USING LIQUID AIR

GERARDO FRANCISCO MEYER FORGUES, ERICK BERAZAIN, & ALAN PAREDES

Instituto de Investigaciones Físicas, Carrera de Física  
Universidad Mayor de San Andrés  
c. 27 Cota-Cota, Campus Universitario, Casilla de Correos 8635  
La Paz – Bolivia

Se determinó el calor latente de fusión del agua por un método de enfriamiento. El experimento consistió en enfriar un vaso de agua utilizando aire líquido y observar el comportamiento de la temperatura durante el tiempo de enfriamiento. La finalidad del experimento es determinar la precisión de este método para obtener el calor latente.

*Descriptores:* Procedimientos de laboratorio — Propiedades termodinámicas — Calor latente  
Código(s) PACS: 06.60.-c, 05.70.Ce

#### ABSTRACT

The latent heat for the fusion of water was determined using a cooling method. In the experiment the water was cooled in a glass using liquid air and observing the cooling temperature against time. The result of this experiment was the determination of the precision of the cooling method for obtaining the latent heat value.

*Subject headings:* Laboratory procedures — Thermodynamic properties — Latent heat

#### 1. INTRODUCCIÓN

La materia es la sustancia de la que todos los objetos están hechos, ésta puede existir en tres estados de agregación o fases diferentes: sólido, líquido y gaseoso. El estado sólido se caracteriza por mantener una estructura definida, el estado líquido no mantiene estructura definida pero tiene cohesión y viscosidad, el estado gaseoso no tiene estructura definida ni cohesión y no opone resistencia a los cambios de forma.

La materia puede pasar de un estado de agregación a otro mediante la extracción o cesión de energía, para el caso de líquido a sólido es necesario extraerla para que sea posible. Durante este cambio la temperatura se mantiene constante por lo tanto la energía extraíble depende solamente de la cantidad de materia que hay y del calor latente de fusión del material.

En el experimento nos centraremos en obtener el calor latente de fusión mediante el enfriamiento con aire líquido sobre un volumen determinado de agua y concluiremos si es un método efectivo y preciso para obtener dicho valor.

#### 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

##### 2.1. Aire Líquido

El aire líquido está compuesto de aire que ha sido licuado mediante aplicación de alta compresión en pistones y posteriormente enfriado a muy bajas temperaturas. Debe ser conservado en un vaso Dewar a temperatura ambiente. El aire líquido absorbe

rápido el calor y es la razón por la que se convierte rápidamente a su estado gaseoso. Se emplea generalmente en la refrigeración de otras sustancias, así como fuente de nitrógeno, oxígeno, argón, y otros gases inertes. El aire líquido tiene una densidad de aproximadamente  $870 \text{ kg/m}^3$ , aunque esta densidad nominal puede ser diferente en muchos casos dependiendo de la composición elemental del aire. Ya que como el aire gaseoso tiene un 78% de volumen de nitrógeno y un 21% de oxígeno, la densidad del aire líquido en composición estándar es calculada teniendo en cuenta la composición decimal de las densidades en estado líquido de los respectivos componentes del aire líquido. Su punto de fusión es  $-216.2 \text{ C}$  y su punto de ebullición es  $-194.35^\circ\text{C}$ . (Wikipedia 2013)

##### 2.2. Calor

El calor es energía que fluye entre un sistema y su entorno en virtud de una diferencia de temperatura entre ellos. (Resnick et al. 1999)

##### 2.3. Capacidad calorífica

Se define la capacidad calorífica de un cuerpo como la razón entre la cantidad de calor  $Q$  suministrada al cuerpo durante cualquier proceso y su cambio de temperatura  $\Delta T$  correspondiente, esto es: (Resnick et al. 1999)

$$C = \frac{Q}{\Delta T}. \quad (1)$$

#### 2.4. Calor específico

Se define como la capacidad calorífica por unidad de masa de un cuerpo.

$$c = \frac{C}{m} = \frac{Q}{m\Delta T}. \quad (2)$$

La capacidad calorífica es característica de un objeto en particular, pero el calor específico caracteriza a una sustancia.

De la ecuación (2) podemos despejar el calor obteniendo:

$$Q = mc\Delta T.$$

Para cambios de temperatura infinitamente pequeños tomamos el diferencial de temperatura y obtenemos:

$$dQ = mcdT. \quad (3)$$

#### 2.5. Calor latente

La cantidad de calor por unidad de masa transferido durante un cambio de fase se llama calor de transformación o calor latente " $L$ " del proceso. El calor transferido durante la fusión o congelación se llama calor latente de fusión.

$$Q = mL. \quad (4)$$

#### 2.6. Ecuación experimental del calor latente de fusión

Derivando la ecuación (4) obtenemos:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dm}{dt}L. \quad (5)$$

Como la masa permanece invariante durante todo el experimento la relación  $\frac{m}{t} = \frac{dm}{dt}$  nos permite analizar solamente el transcurso del tiempo durante el cambio de fase, reemplazamos esta relación en la ecuación (5) y la pasamos a dividir al otro término obteniendo así la ecuación del calor latente:

$$\frac{dQ}{\frac{m}{t}} = L. \quad (6)$$

De esta última expresión es posible conocer numéricamente el denominador utilizando los datos registrados durante el experimento, pero para obtener el numerador es necesario derivar la ecuación (3) respecto al tiempo:

$$\frac{dQ}{dt} = mc \frac{dT}{dt}. \quad (7)$$

Observamos que la relación  $\frac{dT}{dt}$  es la pendiente de la regresión entonces, la pendiente más cercana al calor cedido por el agua se encuentra en los primeros datos de la curva y son los que mejor se adaptan a la línea de tendencia lineal. Experimentalmente se toma desde los 5 primeros datos, hasta la cantidad en el que el coeficiente de correlación disminuya, entonces con 26 datos se encuentra el mejor ajuste.

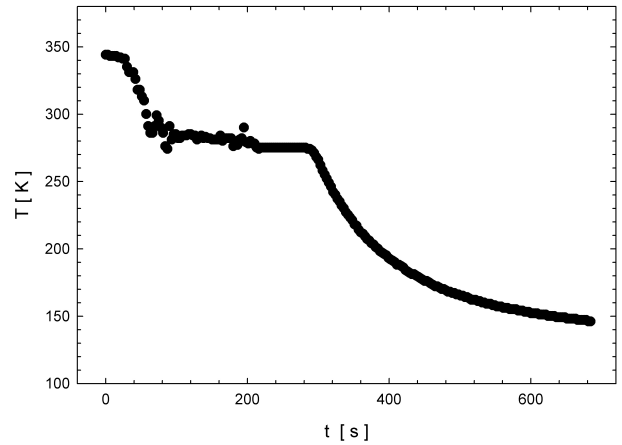


FIG. 1.— Etapa de enfriamiento del agua utilizando aire líquido. Nótese que las líneas curvas representan un enfriamiento del agua a medida que pasa el tiempo y la línea recta representa el cambio de fase de líquido a sólido.

Reemplazando (7) en (6), simplificando las masas y ordenando términos obtenemos la ecuación del calor latente:

$$L = ct \frac{dT}{dt} \quad (8)$$

El error de la ecuación (8) es:

$$\Delta L = c \sqrt{\left[ \frac{dT}{dt} \Delta t \right]^2 + \left[ t \Delta \left( \frac{dT}{dt} \right) \right]^2} \quad (9)$$

### 3. EXPERIMENTO

El objetivo era registrar la temperatura y el tiempo de enfriamiento del agua utilizando aire líquido. Se utilizó 2 vasos precipitados, uno de 250ml y el otro de 500ml; se llenó 200ml de agua de 189g de masa a temperatura ambiente en el vaso de 250ml, calentamos dicha agua en una hornilla eléctrica hasta 75°C, mientras en el vaso de 500ml se preparó una cantidad de aire líquido que no excedía de 250ml. La termocupla se colocó en el fondo del vaso y en el centro del mismo de tal manera que enfrié uniformemente. En el experimento se presentó un problema: en el fondo del vaso precipitado el agua se congelaba más rápido que en la superficie de tal manera que la fase en el fondo era sólida y en la superficie líquida. Finalmente en la última parte del enfriamiento no se presentó ningún problema, el tiempo de enfriamiento no excedió más de 6 minutos y la mínima temperatura registrada fue de -120°C. Se calentó el agua congelada para repetir el experimento una vez más y esta vez se cambió ligeramente la posición de la termocupla en el vaso precipitado, en este caso pudo registrarse una temperatura constante de 2°C en el punto de fusión por un tiempo relevante, continuando con el enfriamiento se llegó a la temperatura mínima de -127°C.

### 4. ANÁLISIS

Al analizar la figura 1 observamos que el enfriamiento del agua tiene tres etapas. Las irregulati-

dades observadas durante los primeros 108 segundos se deben a la evaporación del aire líquido en contacto con el agua caliente, esto se origina por la gran diferencia de temperatura existente entre uno y otro ocasionando una alta rapidez de evaporación, por este motivo el suministro de aire líquido durante la primera parte no fue constante. Durante el cambio de fase se presentó el problema mencionado en el experimento, la solidificación del agua ocurrió primero en la parte inferior del vaso, de tal manera que se obtuvo una mezcla de hielo y agua al mismo tiempo. Dicha mezcla ocasionó un registro irregular de temperatura, es por eso que el cambio de fase ocurrió aproximadamente entre los segundos 108 y 288 sin importar las temperaturas registradas ya que visualmente la termocupla se encontraba recubierta de hielo durante ese tiempo. Cabe resaltar que la temperatura de cambio de fase registrada se encuentra en el intervalo  $[11-2]^{\circ}C$  y esto se debe a la presión atmosférica de la ciudad de La Paz. Durante la última etapa del enfriamiento no se presentó ninguna irregularidad por lo tanto la curva obtenida nos indica la aproximación del equilibrio térmico entre hielo y aire líquido.

Con el anterior análisis se obtendrá el valor del calor latente de fusión del agua. La figura 2 nos muestra los datos que mejor se adaptan a una tendencia lineal donde la pendiente es la más cercana al calor cedido por el agua. Realizando una regresión lineal obtenemos:

$$T = 528.16 - 0.883t.$$

Donde la pendiente nos indica la variación de la temperatura con respecto al tiempo:

$$\frac{dT}{dt} = (-0.883 \pm 0.001) \frac{K}{s}. \quad (10)$$

Considerando el punto de fusión del agua en La Paz ( $65.995 KPa$ ) es mayor a  $0^{\circ}C$  entonces, según la figura 1 obtenemos el tiempo en el cual el agua se encuentra entre  $[6-2]^{\circ}C$  obteniendo un tiempo de:

$$t = (90 \pm 1)s. \quad (11)$$

Por tablas sabemos que el calor específico es:

$$c = 4190 \frac{J}{kgK}. \quad (12)$$

Reemplazando (10), (11), (12) en la ecuación (8) obtenemos:

$$L = -332185 \frac{J}{kg}.$$

Ahora obtenemos el error del calor latente reemplazando los errores de (10), (11), (12) en (9) obteniendo:

$$\Delta L = 3718 \frac{J}{kg}.$$

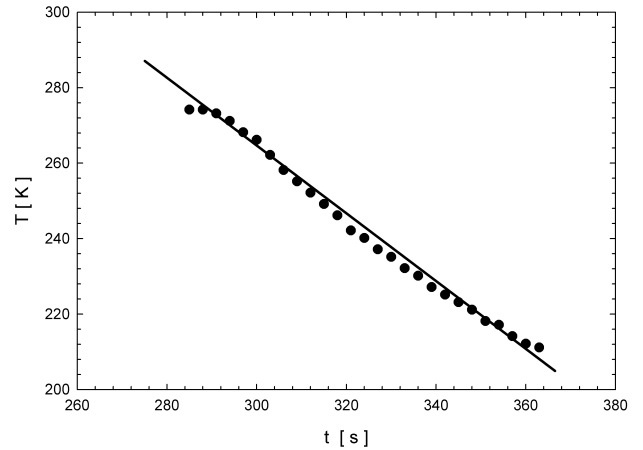


FIG. 2.— Datos de la curva (Figura 1) que se adaptan mejor a una tendencia lineal. Nótese que la temperatura se encuentra en Kelvin.

Obteniendo finalmente el calor latente de fusión del agua:

$$L = (-332185 \pm 3718) \frac{J}{kg}.$$

Es preciso tomar en cuenta que el signo negativo indica una absorción o extracción de energía para que ocurra el cambio de fase. En el caso del calentamiento es necesario proporcionar energía, obteniendo así un calor latente positivo. El signo del calor latente está determinado por la pendiente de la tendencia lineal.

El error porcentual del calor latente es:

$$e = 1.12\%.$$

El error porcentual respecto al valor nominal de  $333 kJ/kg$  es:

$$e_n = 0.24\%.$$

Tanto el error respecto al valor nominal y el error relativo porcentual son menor a 5% de tal manera que el método utilizado es muy preciso y efectivo.

## 5. CONCLUSIONES

El calor latente de fusión del agua es la energía necesaria para cambiar de estado líquido a sólido o viceversa, este puede ser hallado experimentalmente con mucha precisión mediante el enfriamiento con aire líquido, obteniendo errores muy bajos. Cabe resaltar que durante la etapa de solidificación se produce una mezcla de agua y hielo haciendo difícil el registro de la temperatura, es por eso que el tiempo de cambio de fase utilizado para el experimento fue durante las temperaturas  $6^{\circ}C$  y  $2^{\circ}C$ , entendiendo que el punto de fusión es ligeramente mayor en la altura de La Paz debido a la presión atmosférica, aún así, este valor está dentro de nuestra estimación.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Licenciado Alfonso Velarde Chávez por su colaboración.

## REFERENCIAS

Resnick, Halliday & Krane (1999), *Física Volumen 1* (Cuarta Edición) (Editorial Continental)

Wikipedia (2013), [http://es.wikipedia.org/wiki/Aire\\_liquido](http://es.wikipedia.org/wiki/Aire_liquido)