

# Técnicas Experimentales II

## Laboratorio de Termodinámica

### Demostraciones

### El pájaro bebedor

J. Güémez

*Departamento de Física Aplicada,*  
Universidad de Cantabria.

Diciembre 4, 2003

El pájaro bebedor es un juguete bastante popular, que se mueve sin partes móviles aparentes. Una vez se pone a oscilar continúa haciéndolo indefinidamente siempre que no le falte provisión de agua.

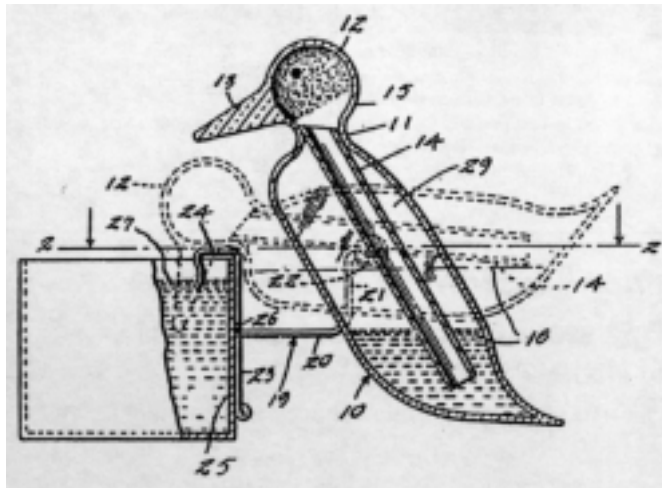


Figura 1: Dibujo de la patente original de 1946 del pájaro bebedor [1].

La parte esencial de este aparato son dos bulbos de vidrio unidos por un tubo también de vidrio. En el centro del tubo se tiene acoplada una barra metálica que se apoya de tal forma que el conjunto pueda oscilar. En su interior hay un líquido volátil, éter etílico normalmente, que llena algo más de la mitad del bulbo y el tubo de vidrio penetra en el líquido hasta casi llegar al fondo de este bulbo inferior. El bulbo superior, unido directamente al tubo, está recubierto de un fieltro y tiene una pequeña protuberancia, también recubierta de fieltro.

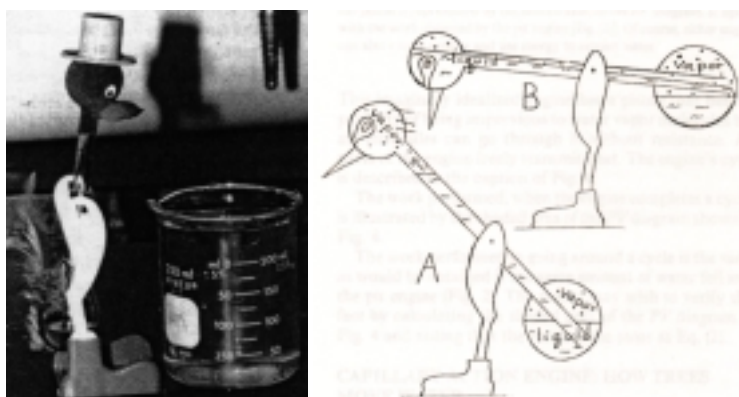


Figura 2: Pájaro bebedor con un diseño más moderno. Esquema del funcionamiento del pájaro bebedor [2].

Se coloca el pájaro bebedor, inicialmente en posición vertical, al lado de un vaso con agua, de tal forma que en posición horizontal la protuberancia –el pico del pájaro– se introduzca en el agua. Se moja el fieltro de su cabeza con agua y se espera. Al cabo de poco tiempo el pájaro empieza a girar, alcanza la horizontal, moja su pico y vuelve a levantarse.

En la Fig. 2 se muestra un modelo más moderno del pájaro bebedor y su mecanismo de funcionamiento. El bulbo inferior está lleno casi hasta la mitad de un líquido volátil –habitualmente  $\text{CF}_3\text{CHCl}_2$ , con un punto de ebullición de  $28\text{ }^\circ\text{C}$ –. Cuando el fieltro de la cabeza se humedece, si el aire no se encuentra saturado de humedad, parte del agua se evapora en un proceso adiabático que hace que disminuya la temperatura del agua de la cabeza. Aunque la variación de temperatura es pequeña, debido a que la presión de vapor crece exponencialmente con la temperatura y a que el líquido está próximo a su temperatura de ebullición, se establece una gran diferencia de presión entre la cabeza y la base.

Con el tubo de vidrio casi en el fondo del bulbo inferior, la mayor presión de la base obliga al líquido a subir por el tubo. Cuando parte del líquido alcanza la cabeza, el mecanismo se desestabiliza y gira hasta ponerse horizontal. En esa posición la cabeza se humedece de nuevo y al quedar el extremo inferior del tubo al descubierto se igualan las presiones y el líquido desciende al bulbo inferior. El pájaro se desestabiliza de nuevo y recupera la posición vertical. De nuevo se evapora algo de agua y el proceso se repite. Por tanto, se necesita que el tubo llegue casi al fondo del líquido contenido en el bulbo inferior –pues de otra manera la diferencia de presiones no obligaría al líquido a subir (en caso de que el tubo no fuese casi hasta el fondo habría que esperar a que el líquido inferior condensase en la cabeza, un proceso muy lento)– y que el líquido tenga un punto de ebullición cercano a la temperatura ambiente, pues de otro modo la diferencia de presiones no es suficiente como para conseguir elevar el líquido hasta la cabeza.



Figura 3: El pájaro bebedor colocado dentro de un desecador –recipiente de vidrio herméticamente cerrado– deja de oscilar al cabo de pocos minutos. Cuando la tapa del desecador vuelve a retirarse, el pájaro vuelve a oscilar en pocos segundos.

Aunque se establece una diferencia de temperaturas entre el bulbo inferior y el superior, la razón última hay que buscarla en el desequilibrio termodinámico que supone que el agua vapor contenida en la atmósfera tenga un potencial químico –una presión– menor que el potencial químico del agua líquida de la cabeza del pájaro. Es decir, la presión del agua en la atmósfera es menor que la presión de vapor de equilibrio del agua a esa temperatura, por lo que agua líquida y agua vapor no están en equilibrio y el agua a mayor potencial se traslada a la región de menor potencial (menor función de Gibbs). Una forma de comprobar que esto es así es encerrar al pájaro en un recipiente cerrado. En la Fig. 3 se muestra un pájaro bebedor encerrado en un desecador. Aunque al principio el pájaro oscila normalmente, al cabo de pocos minutos cesa toda oscilación. Si se abre la tapa, el pájaro vuelve a oscilar normalmente.



Figura 4: El pájaro bebedor colocado debajo de un ventilador de aire. Con una frecuencia de un trago cada 7 segundos se pasa a una frecuencia de 1 trago por segundo. Pájaro bebedor –con el bulbo inferior pintado de negro– sin agua iluminado por la luz de una bombilla próxima. El pájaro oscila normalmente.

Hay máquinas térmicas que funcionan utilizando una diferencia de temperaturas –no equilibrio térmico–; otras utilizan una diferencia de presiones –no equilibrio mecánico–; otras utilizan una reacción química –no equilibrio químico–. El pájaro bebedor es una máquina térmica que utiliza una diferencia de potencial químico, pero sin que medie reacción química –no equilibrio material–, lo que la convierte en un ejemplo bastante curioso de máquina térmica.

Una modificación interesante respecto de montaje habitual del pájaro es hacer que una corriente de aire –por ejemplo, con la ayuda de un secador de pelo– circule cerca de la cabeza del pájaro. En ese caso, el intervalo de tiempo entre dos tomas de agua se reduce considerablemente, tanto más cuanto más caliente es el aire o más intensidad de corriente hay.

Otra modificación muy interesante es construir un pájaro bebedor sin agua, pero iluminado. Se pinta de color negro el bulbo inferior del pájaro –el que contiene el líquido cuando está en posición vertical– y se le ilumina desde cerca con una bombilla encendida. Al cabo de poco tiempo el pájaro comienza a oscilar como si tuviera agua, aunque no hay nada de agua en este caso.

Se puede hacer una estimación de las magnitudes observadas, en concreto del periodo entre sorbos del pájaro (en condiciones controladas de humedad ambiente). Suponiendo que el pájaro contenga eter etílico ( $C_4H_{10}O$ , con  $M = 74,12 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ,  $T_E = 34,48 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $307,63 \text{ K}$ ,  $\Delta_E h = 360,06 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  y densidad  $\rho = 714 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), se tiene que para una diferencia de alturas de 7 cm entre el líquido en el bulbo inferior y la cabeza se debe establecer una diferencia de presión de

$$\Delta P = 714(7 \times 10^{-2})9,8 = 4,90 \times 10^2, \text{ Pa}.$$

A la temperatura de  $22 \text{ }^\circ\text{C}$ , la presión de vapor del eter es de

$$\ln \frac{P}{1,013 \times 10^5} = -\frac{360,06 \times 10^3}{8,314} \left( \frac{1}{295,15} - \frac{1}{307,63} \right),$$

de donde  $P(22) = 2,6 \times 10^2 \text{ Pa}$ .

Para lograr esta diferencia de presión que eleve la columna de líquido (diferencia de presiones de vapor del líquido en la cabeza y en el bulbo inferior) se necesita una diferencia de temperatura entre cabeza y bulbo inferior de

$$\ln \left( 1 + \frac{4,90 \times 10^2}{2,6 \times 10^2} \right) \approx -\frac{360,06 \times 10^3}{8,314} \frac{\Delta T}{298^2},$$

de donde  $\Delta T = -2,13 \text{ }^\circ\text{C}$ . (Aproximadamente la misma diferencia de temperatura se debe establecer para lograr que el líquido ascienda por el tubo cuando el pájaro sin agua y con el bulbo inferior pintado de negro es iluminado con luz).

Cuando la cabeza del pájaro se empapa, hay una diferencia de peso de 0,4 g. Por tanto, con  $\Delta_E h = 2257 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  para el agua, la masa que debe evaporarse para lograr esta disminución de la temperatura es de se deben

evaporar  $2257 m = 4,18 \times 0,4(2,13)$ ,  $m = 1,6 \times 10^{-3}$  g de agua (en un proceso adiabático) para lograrlo.

Con la cabeza empapada tarda aproximadamente 50 minutos en perder todo el agua por evaporación. Por tanto, con una tasa de evaporación de  $0,4/(50 \times 60) = 1,33 \times 10^{-4}$  g·s<sup>-1</sup>, debe tardar unos  $1,6/1,33 = 12$  s en evaporar el agua necesaria como para que el líquido suba hasta la cabeza. Se observa un periodo entre sorbos sucesivos de unos 9 s.

Para la evaporación por convección en atmósfera no saturada, se tiene que

$$\frac{\Delta m}{\delta t} = -hA(H - H_s) ,$$

Tomando para el agua en el fieltro un coeficiente de convección de  $h = 75,8$  g·s<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup> (para un botijo es del orden de  $h = 22$  g·s<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>, casi tres veces menor; parte de este efecto se debe a la estructura del tejido del fieltro, que aumenta la superficie de evaporación frente a la superficie que se mide), para una cabeza de aproximadamente  $r = 0,5$  cm de radio,  $A = 4\pi r^2 = 3,14 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>, con un contenido de saturación en agua a temperatura ambiente de  $H_s = 0,018$  g agua g aire<sup>-1</sup> y con una humedad relativa del 60 %, se tiene que el tiempo que tardan en evaporarse esos gramos de agua sería de

$$\Delta t = \frac{1,6 \times 10^{-3}}{75,8 \times 3,14 \times 10^{-4} (0,011 - 0,018)} \approx 10 \text{ s} .$$

A medida que el grado de humedad se va aproximando a la saturación, el periodo entre sorbos aumenta hasta hacerse infinito cuando el vapor de agua satura (esto es lo que sucede dentro del desecador). Cuando se le aplica una corriente de aire, el coeficiente de convección aumenta, con lo que el periodo entre sorbos disminuye.

## Referencias

- [1] R. Mentzer, *The drinking bird—The little heat engine that could*, The Physics Teacher **31**, 126 (1993)
- [2] C. Bachhuber, *Energy from the evaporation of water*, Am. J. Phys. **51**, 259 (1983)
- [3] H. R. Crane, *What does the drinking bird know about jet lag*, The Physics Teacher **27**, 470 (1989)
- [4] J. L. Gaines, *Dunking Duck*, Am. J. Phys. **27**, 189 (1959).
- [5] J. S. Miller, *Physics of the Dunking Duck*, Am. J. Phys. **26**, 42 (1958)
- [6] K. B. Kolb, *Drinking Duck shutter*, The Physics Teacher, Vol. **5**, p. 342 (1967)
- [7] D. L. Frank, *The drinking bird and the scientific method*, Journal of Chemical Education, Vol. **50** , p. 211 (1973)

- [8] R. Plumb, *Physical chemistry of the drinking duck*, Journal of Chemical Education, Vol. **50** , p. 212 (1973)