

Determinación de presiones parciales: el caso de $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$ en aire

R. Acevedo Chávez y M. Eugenia Costas Basin

Departamento de Fisicoquímica, Facultad de Química

Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 04510, México.

e-mail: maria_eugenia.costas@unam.mx

Received 20 June 2016; accepted 25 July 2016

En los cursos introductorios sobre Termodinámica Clásica, es obligada la revisión del tema Ecuaciones de Estado y como categoría inicial, a los sistemas PVT, con uno o más componentes. Para estos últimos, es requisito la comprensión del concepto presión parcial de los componentes en una mezcla gaseosa. Si bien la revisión en el pizarrón es factible, la experimental encuentra dificultades; por ejemplo, se requiere de sensores selectivos para mediciones específicas de presiones manométricas, los cuales no son comunes en los laboratorios para Docencia Experimental en licenciatura. Esta dificultad puede ser superada si se elige cierto tipo de mezclas fluidas gaseosas, como lo es el aire atmosférico, y se enfoca el estudio en la conducta del $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$ presente en él. De hecho, lo anterior forma parte de la Psicrometría. Con base en lo anterior, en esta comunicación se presentan los fundamentos psicrométricos, el desarrollo experimental y los resultados concernientes a la determinación de la presión parcial de $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$ presente en un aire atmosférico local temporal sometido a estudio. Como complemento, se determina el valor de la temperatura del aire (temperatura de rocío) a la que (y bajo condiciones isobáricas) el $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$ presente en dicho aire, adquiriría la propiedad de vapor saturado.

Descriptor: Presión parcial; experimento licenciatura; humedad relativa.

In introductory Classical Thermodynamics courses, the Equations of State topic is necessarily revised, and the one or more components PVT systems, are the selected examples in almost all the cases. For multicomponent systems, the understanding of the concept of component partial pressure is required. Although the revision in classroom is feasible, the experimental study is difficult; for example, selective pressure sensors are required for the specific measurement of manometric pressures, which are far from being common in teaching undergraduate laboratories. This difficulty can be avoided if certain gaseous fluid mixtures are chosen, as atmospheric air, and the study is focused on the behavior of $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$ contained in the air. In fact, this is what is called Psychrometry. In this communication, the psychrometric basis, the experimental development and the results concerning the $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$ partial pressure in a local atmospheric air determination, are presented. As a complement, the air temperature value (dew point) at which the $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$ becomes a saturated vapor (isobaric process), is obtained.

Keywords: Partial pressure; undergraduate experiment; relative humidity.

PACS: 05.70.Ce; 51.30.+i

1. Introducción

El tema Ecuaciones de Estado es tratado desde diversos puntos de vista en los cursos de Termodinámica Clásica a nivel licenciatura. Mientras que en algunas áreas se trata de manera formal y general para una diversidad de sistemas, en otras, se circunscribe al estudio de gases, y como ejemplo típico se estudia inicialmente el comportamiento PVT de un gas en el límite $\rho \rightarrow 0$. En el estudio de este caso ideal, se considera primero a un sistema de un componente, para posteriormente tratar a sistemas constituidos por más de una sustancia. Habitualmente, en la mezcla gaseosa no se considera que uno de los componentes pueda existir en fase vapor (es decir, un fluido que se encuentra a las condiciones de P y T de la mezcla, por debajo de su temperatura crítica T_c y presión crítica P_c , y por tanto, es condensable por factores de tipo mecánico (presión), o térmico (temperatura)).

Una clase de mezcla de gases - vapor, por demás interesante y de gran importancia en la vida contemporánea, es la constituida por aire - $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$. A diferencia de una mezcla de gases no reactivos, en donde la composición no cambia por efectos de T y P , en una mezcla aire - $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$ el contenido de $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$ puede sufrir una modificación drástica por simples cambios modestos en la temperatura de la mezcla. Al estudio

de esta mezcla aire - $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$, se le conoce como Psicrometría, y resulta de suma importancia en procesos de humidificación y secado en una diversidad enorme de industrias que requieren del control del contenido de agua en el aire, así como en el acondicionamiento de aire en edificios y construcciones variadas, en la predicción meteorológica, en el diseño arquitectónico, en la misma experimentación científica, etcétera. Existe una amplia variedad de textos en los que se estudian algunos de estos temas (1-12).

Sin embargo, el estudio experimental de una mezcla de gases y en particular, la medición de presiones parciales, requiere de instrumentación especial (13,14) que no es fácil de encontrar en laboratorios dedicados a la docencia. Por otro lado, en la literatura dedicada a la docencia en ciencias, existen escasos ejemplos de medición de presiones parciales de los componentes de una mezcla gaseosa. En uno de ellos (15) se estima la presión parcial de CO_2 que se genera en una reacción química, y del aire expelido de los pulmones. En otro (16), se estima solamente la presión parcial máxima de agua vapor en un aire en condiciones de vapor saturado; en este estudio, se requiere de aire seco, bombas de alto vacío y manómetros electrónicos calibrados y con ajuste a cero.

Aquí mostramos que la determinación de la presión parcial del $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$ en el aire, se puede realizar de manera sen-

cilla y confiable, con una infraestructura accesible en un laboratorio de docencia, a través de la metodología empleada para la medición de humedad relativa en el aire.

2. Antecedentes

Para el estudio inicial de la Psicrometría (aunque se comprende que este tipo de mezclas es de gran complejidad), se puede considerar en un primer análisis, que tanto el $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$ como el resto de gases (llamado aire base seca, o aire seco) se comportan como gases que siguen el modelo ideal, y así también sus mezclas.

El estado termodinámico del $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$ en dichas mezclas, queda determinado por su temperatura (θ) y presión parcial (p). Aquí, la θ del $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$ es la misma que la θ de la mezcla, y la presión parcial (p) es la que está asociada a su fracción molar (y) y a la presión total (P) de la mezcla referida, y que en la gran mayoría de los casos es la misma presión atmosférica local temporal. En función de los valores de θ y p , se pueden tener propiedades diferentes en las mezclas aire - $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$.

Tradicionalmente y en campos diversos de la Ingeniería, el contenido de $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$ en el aire recibe el nombre de humedad. Sobre este parámetro del aire existe más de una definición: humedad específica, humedad de saturación, porcentaje de humedad, y humedad relativa. Es esta última la más común en la vida diaria.

Para adentrarnos en la definición de humedad relativa, debemos analizar algunos conceptos. Una mezcla aire - $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$, en la cual y a cierta θ_i , la presión parcial de $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$ es justamente la que corresponde al equilibrio de fases $\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}(\text{v})$ a θ_i , se conoce como aire saturado, y es común que se presente, por ejemplo, en costas del Ecuador (o cercanas en latitud) y en su época de verano. Un aire insaturado (o no saturado) es entonces aquel para el que la presión parcial de $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$ está por debajo de la correspondiente al equilibrio de fases $\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}(\text{v})$ a θ_i . El aire sobresaturado es aquel en el cual y a cierta θ_i , se tiene momentáneamente una presión parcial de $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$ mayor que la correspondiente al equilibrio de fases $\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}(\text{v})$ a θ_i . Este es un caso de fases fuera del equilibrio termodinámico, y en consecuencia se producirá una condensación parcial de $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$ a la misma θ_i , hasta que la presión parcial del $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$ restituya su valor correspondiente al equilibrio (l) \rightleftharpoons (v) a θ_i , resultando por tanto un aire tipo saturado.

Si un aire no saturado baja su temperatura a presión total constante, la mezcla llegará a un valor de θ_i tal, a la cual $P_{\text{H}_2\text{O}(\text{v})}$ será igual a la del equilibrio (l) \rightleftharpoons (v) a dicha θ_i . Se tiene entonces, que por simple abatimiento en la θ de la mezcla (a $P_T = \text{constante}$), un aire no saturado pasa a ser saturado. A la θ_i de saturación del aire, se le denomina θ del punto de rocío (θ_r). A este valor de θ_r , se tienen las condiciones dadas de temperatura y presión, para el inicio de la condensación parcial del $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$; aparecen microgotas de $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ en el aire, que se identifica coloquialmente como rocío, niebla, o neblina. A fin de indicar el grado de insaturación de la mezcla aire

- $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$, se utiliza comúnmente el término humedad relativa (H_r). Esta se define como el cociente de la presión parcial de $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$ en la mezcla a θ_i ($P_{\text{H}_2\text{O}(\text{v}) \text{ actual} @ \theta_{b.s.}}$), y la presión de saturación (equilibrio (l) \rightleftharpoons (v)) del $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ a la misma θ_i ($P_{\text{H}_2\text{O}(\text{l}) @ \theta_{b.s.}}^0$). Dicho parámetro se expresa comúnmente en (%). Se tiene entonces que:

$$H_r (\%) = \left(\frac{P_{\text{H}_2\text{O}(\text{v}) \text{ actual} @ \theta_{b.s.}}}{P_{\text{H}_2\text{O}(\text{l}) @ \theta_{b.s.}}^0} \right) \times 100 \quad (1)$$

donde $\theta_{b.s.}$ es la θ_i del aire, conocida como temperatura de bulbo seco.

$P_{\text{H}_2\text{O}(\text{v}) \text{ actual}}$ se obtiene a través de la determinación del valor de θ_r : con ésta y la ayuda de tablas (l) \rightleftharpoons (v) para el H_2O , se determina dicha presión parcial, que se asume como igual a la presión de vapor saturado en el equilibrio $\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}(\text{v})$ al valor de θ_r . El denominador se determina a través de $\theta_{b.s.}$. Con este valor y la ayuda de tablas (l) \rightleftharpoons (v) para el H_2O , se determina la presión de vapor correspondiente a la $\theta_{b.s.}$. Este valor de presión, representa la presión parcial máxima que puede ejercer el $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$ en el aire a $\theta_{b.s.}$.

Respecto a lo anterior, la determinación de la temperatura de rocío (θ_r) se realiza a través de un experimento elaborado y minucioso. Consiste (sintéticamente) en disponer de una superficie metálica pulida y brillante, cuya θ se hace descender en etapas discretas. El aire bajo estudio se hace pasar a una velocidad baja y se pone en contacto térmico y equilibrios térmicos sucesivos con la superficie metálica. Cuando la superficie se empieza a empañar, se toma registro de la θ en dicho inicio de condensación del $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$ presente en el aire. Dicha θ es θ_r .

Lo descrito anteriormente, es una metodología en la determinación de la $H_r(\%)$. En Psicrometría existe otro parámetro, conocido como temperatura de bulbo húmedo o bulbo mojado ($\theta_{b.m.}$), que es la registrada por un termómetro de bulbo (el cual está cubierto estrechamente por una gasa saturada de $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$), cuando el aire bajo estudio es hecho pasar por el bulbo mojado, a una cierta velocidad. Para un aire no saturado, $\theta_{b.s.} > \theta_{b.m.} > \theta_r$. En el caso de aire saturado, las tres temperaturas son iguales. Así, el simple análisis de los valores de $\theta_{b.s.}$ y de $\theta_{b.m.}$, permite hacer inferencias respecto al tipo de aire que se está estudiando (si es no saturado, o saturado). A medida que la $\theta_{b.m.}$ es cada vez menor respecto a $\theta_{b.s.}$, se tendrá un aire de insaturación creciente (contenido descendente de $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$).

Estos parámetros permiten obtener también la presión parcial actual del $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$ a través de ecuaciones empíricas que relacionan estos tipos de θ ($\theta_{b.s.}$ y $\theta_{b.m.}$), y que consideran también el efecto de la presión atmosférica. Una de ellas (y no la única) es la ecuación de W.H. Carrier (17), en la que $\theta_{b.m.}$ es en realidad la temperatura de bulbo mojado (de saturación adiabática). En la práctica, y solo para el sistema aire - $\text{H}_2\text{O}(\text{v})$, la θ termodinámica de bulbo mojado es muy próxima, o incluso igual (dentro del error de medición) a la $\theta_{b.m.}$ obtenida con un termómetro de bulbo mojado (bulbo cubierto con gasa saturada de $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$). La ecuación de W.H. Carrier es:

$$P_{\text{H}_2\text{O(v) actual}} \cong P_{\text{H}_2\text{O(l)}\theta_{b.m.}}^0 - \left\{ \frac{(P_{\text{atm}} - P_{\text{H}_2\text{O(l)}\theta_{b.m.}}^0)(\theta_{b.s.} - \theta_{b.m.})}{A - (B)(\theta_{b.m.})} \right\}$$

En ella, los valores de A y B son dependientes del sistema de unidades empleado. Por ejemplo, para el SI, se tiene:

- a) $P_{\text{H}_2\text{O(v) actual}}$ (Pa)
- b) $P_{\text{H}_2\text{O(l)}\theta_{b.m.}}^0 \equiv$ presión de vapor saturado a la $\theta_{b.m.}$ (Pa)
- c) $P_{\text{atm}} = P$ atmosférica (Pa)
- d) $(\theta_{b.s.} - \theta_{b.m.})$ (K)
- e) $\theta_{b.m.}$ (K)
- f) $A = 1940$ K
- g) $B = 1.44$ (adimensional)

De esta forma y realizando un experimento sencillo en el que se mide la temperatura del aire ($\theta_{b.s.}$), la temperatura de bulbo mojado ($\theta_{b.m.}$), y la P_{atm} , se puede determinar la presión parcial del H₂O(v) en el aire, y en consecuencia también la humedad relativa (%) del mismo.

3. El Experimento

A. Las condiciones iniciales para el termómetro de bulbo seco (a) y termómetro de bulbo mojado (b) se muestran en la Fig. 1.

En la Fig. 2, se muestra (a) el instrumento de medición de las temperaturas de bulbo seco y mojado (psicrómetro), y el detalle (b) del bulbo mojado

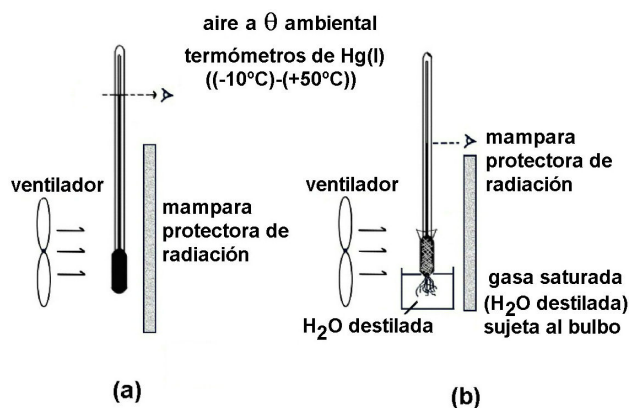


FIGURA 1. Esquema experimental para la medición de la temperatura de bulbo seco (a) y de bulbo mojado (b).

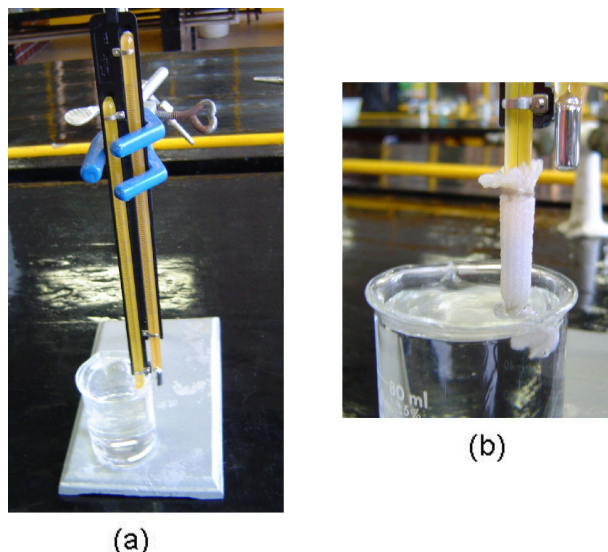


FIGURA 2. (a) Psicrómetro utilizado y (b) detalle del bulbo mojado.

B. Técnica

- 1) Llenar un vaso de vidrio con H₂O(l) monodestilada, la cual mojará la mecha del bulbo, y que se llamará aquí bulbo mojado. Asegurarse que en el proceso de llenado se moje muy bien la mecha, y en toda su longitud.
- 2) Colocar el instrumento (Psicrómetro) en una posición vertical fija.
- 3) Aguardar ~ 10 minutos para que la mecha absorba plenamente el H₂O(l), es decir, quede saturada y por tanto, empape al bulbo.
- 4) Colocar el ventilador del lado del termómetro con el bulbo seco. Graduar su distancia y velocidad, con el fin de satisfacer la condición de $v \sim 4.6$ m/s a la altura de los dos bulbos. Para ello, emplear un anemómetro.
- 5) Con ayuda de la lupa y empleando una mampara (protectora de los bulbos contra la radiación corporal), tomar registros periódicos (~ cada dos minutos) de ambas temperaturas. Entre lectura y lectura, es pertinente alejarse del instrumento.
- 6) La primera lectura en estabilizarse es la correspondiente a la $\theta_{b.s.}$. La otra, mostrará descensos paulatinos hasta un valor mínimo, estable. Tomar registro de ambas. Todo este proceso de estabilización térmica puede llevarse varios minutos (~ 10 – 15). Tomar registro de la presión atmosférica local temporal.

4. Resultados

En un experimento realizado, se obtuvieron los datos siguientes:

- a) $P_{\text{atm}} = 22.84 \text{ "Hg est.} = 580.14 \text{ torr} = 0.763 \text{ atm}$
 b) $\theta_{b.s.} = 21.5^\circ\text{C}$
 c) $\theta_{b.m.} = 16.5^\circ\text{C}$

De tablas (l) \rightleftharpoons (v) para el H_2O (18), se tiene que:

- d) $P_{\text{H}_2\text{O}(l)}^0 = P_{\text{H}_2\text{O}(l)@21.5^\circ} = 19.231 \text{ torr}$
 e) $P_{\text{H}_2\text{O}(l)}^0 = P_{\text{H}_2\text{O}(l)@16.5^\circ} = 14.076 \text{ torr}$

Con estos datos, se puede conocer el valor de la presión parcial (actual) del $\text{H}_2\text{O}(v)$ en dicho aire. Para ello se emplea la ecuación de W.H. Carrier.

Para el experimento realizado, se tiene que:

- f) $P_{\text{H}_2\text{O}(v)}$ (actual en el aire a 21.5°C) $\cong 12.22 \text{ torr}$.

Este es el valor de la presión parcial de $\text{H}_2\text{O}(v)$ en el aire, cuya θ bulbo seco es 21.5°C y su presión total es 0.763 atm (580.14 torr). Dicho valor representa el 2.1% de la presión total del aire.

Como información adicional, si se toma el valor de la presión parcial actual ($P_{\text{H}_2\text{O}(v)} = 12.22 \text{ torr}$) y se utilizan las tablas $\text{H}_2\text{O}(l)\text{-H}_2\text{O}(v)$ (18), se puede determinar a qué temperatura se saturará el $\text{H}_2\text{O}(v)$ presente en el aire. El valor

obtenido es 14.3°C . Dicho valor se conoce como la θ de rocío para el aire en estudio.

Por último y relacionando la $P_{\text{H}_2\text{O}(v)}$ actual con la $P_{\text{H}_2\text{O}(v)}$ máxima ($P_{\text{H}_2\text{O}(l)}^0 = P_{\text{H}_2\text{O}(l)@\theta_{b.s.}}$) se tiene que la $H_r(\%)$ es igual a 63.5 . Este valor significa que a la θ del aire (21.5°C) y a 0.763 atm , la presión parcial actual del $\text{H}_2\text{O}(v)$ es el 63.5% de su valor máximo posible. Bajo dichas condiciones, el $\text{H}_2\text{O}(v)$ es un vapor no saturado. Se dice también que el aire es insaturado.

5. Conclusiones

Con base en lo expuesto anteriormente, se puede concluir que con una infraestructura experimental accesible (psicrómetro y barómetro calibrados, y un anemómetro), es factible revisar cuantitativamente el concepto de presión parcial de $\text{H}_2\text{O}(v)$ en aire, así como determinar otros parámetros básicos en la Psicrometría, de gran importancia en ramas diversas científicas, tecnológicas e industriales.

Agradecimientos

Los autores hacen un reconocimiento a la DGAPA-UNAM por el apoyo otorgado al proyecto PAPIIME PE101315.

1. A.S. Foust, L.A. Wenzel, C.W. Clump, L. Maus y L.B. Andersen, *Principles of Unit Operations* (John Wiley & Sons, Inc. USA. 1960).
2. J.V. Iribarne, *Termodinámica de la Atmósfera* (Editorial Universitaria de Buenos Aires. Argentina. 1964).
3. W.L. McCabe y J.C. Smith, *Unit Operations of Chemical Engineering* (McGraw-Hill Book Co. USA. 1965).
4. F.F. Huang, *Engineering Thermodynamics. Fundamentals and Applications* (McMillan Pub. Co., Inc. USA. 1976).
5. G.J. Van Wylen y R.E. Sonntag *Fundamentals of Classical Thermodynamics*. (3rd Ed. John Wiley & Sons, Inc. Singapore. 1985).
6. W.Z. Black y J.G. Hartley, *Thermodynamics* (Harper & Row, Pub. Inc. USA. 1985).
7. L.D. Russell y G.A. Adebisi, *Classical Thermodynamics* (Saunders College Pub. Florida. 1993).
8. Y.A. Çengel y M.A. Boles, *Thermodynamics* (McGraw-Hill, Inc. USA. 1994).
9. R. Goody, *Principles of Atmospheric Physics and Chemistry* (Oxford University Pres, Inc. USA. 1995).
10. M.W. Zemansky y R.H. Dittman, *Heat and Thermodynamics* (7th Ed. The Mc-Graw-Hill Co., Inc. Singapore. 1997).
11. G.W. Petty, *A first Course in Atmospheric Thermodynamics* (Sundog Publishing. USA. 2008).
12. R. Acevedo Chávez y M.E. Costas, *Psicrometría: Principios básicos y protocolos experimentales diversos* (DGAPA-UNAM, México, 2015).
13. L. Glodstone, *Rev. Sci. Ins.* **35** (1964) 1265.
14. C. Wang, P. Ghosd, P. Kornreich, *J. Vac. Sci. Technol. A* **7** (1989) 2393.
15. D. Feigl, *J. Chem. Ed.* **51** (1974) 273.
16. M.K. Smith, *Physics Teacher* **16** (1978) 654.
17. Ver por ejemplo W.H. Carrier, *Transactions of the ASME*, (1911); F.F. Huang, *Ingeniería Termodinámica: Fundamentos y Aplicaciones* (CECSA, México, 1981).
18. *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (The McGraw-Hill Companies, Inc. 8th Ed. 2008).