

Obtención de las curvas de saturación de alcohol etílico



Valentín Valdés González, Carlos Álvarez Macías, Sergio Hernández Zapata
Facultad de Ciencias., Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad 3000
Circuito Exterior S/N, C.P. 04510 Ciudad Universitaria México D. F

E-mail: valentin@ciencias.unam.mx

(Recibido el 24 de Enero de 2010; aceptado el 21 de Octubre de 2010)

Resumen

El que dos fases de una sustancia coexistan en equilibrio implica que la presión y la temperatura no son independientes. La curva que representa esta relación se llama de saturación. Utilizar la información de esta, es de particular importancia en fenómenos de refrigeración, ya que al controlar la presión se puede controlar la temperatura a la cual ocurre la evaporación, además de tener una mejor comprensión de los procesos termodinámicos involucrados. En el presente trabajo, se muestran los resultados de un experimento en donde se mide la curva de saturación de alcohol etílico. El objetivo es obtener un buen método para estudiar propiedades de saturación de diferentes sustancias y construir un dispositivo didáctico para mostrar en clase cómo funciona el evaporador de un refrigerador. El trabajo se complementa con una serie de experimentos demostrativos que ilustran la importancia del comportamiento alrededor de la saturación para explicar diversos procesos físicos y atmosféricos.

Palabras clave: Saturación, refrigeración, evaporador.

Abstract

If two phases of a substance coexist in equilibrium this implies that pressure and temperature are not independent. The curve representing this relationship is called saturation curve. It is particularly important to use this information in cooling phenomena since by controlling pressure we may control the temperature at which evaporation occurs. It also helps to get a better understanding of the thermodynamic processes involved.

In this paper we show the results of an experiment where the saturation curve of ethylic alcohol is measured. The goal is to obtain a good method for studying saturation properties of various substances and for building a teaching device to demonstrate in the classroom how the evaporator in a refrigerator works. This is complemented by a series of demonstrative experiments illustrating the importance of the phase behaviour close to the saturation curve if several physical and atmospheric processes are to be explained.

Keywords: Saturation, Refrigeration, evaporator.

PACS: 68.03.Fg, 07.20.Mc, 68.03.Fg, 64.70.F

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Las propiedades físicas que describen el estado de equilibrio de un sistema termodinámico se conocen como variables de estado. Se define una sustancia pura como aquella que es uniforme e invariante en su composición química, mientras que una sustancia compresible se caracteriza porque la única forma de realizar trabajo es a través de un cambio de volumen, de acuerdo a [1]. En una sustancia pura y compresible las variables típicas, que ilustran de manera sencilla los cambios de fase, son la presión, el volumen y la temperatura. La relación funcional entre estas (ecuación de estado) determina completamente el comportamiento termodinámico del sistema.

En la figura 1 la llamada zona de saturación, donde coexisten las fases líquida y de vapor, se encuentra delimitada por una línea punteada. Obsérvese que la zona saturada está limitada por dos curvas, una de líquido

saturado y otra de vapor saturado. Estas curvas, que se unen en el llamado punto crítico, junto con la llamada línea triple, donde pueden coexistir líquido sólido y vapor, definen completamente la frontera de la zona de saturación. En la figura 2 se muestra la misma situación física pero en un diagrama donde las variables de estado utilizadas son la presión y el volumen. A la derecha de la curva de vapor saturado se encuentra, en ambas figuras (1 y 2), la zona de vapor sobrecalentado, es decir vapor que está a una temperatura mayor que la que tendría si, a la misma presión, se encontrara saturado. Y a la izquierda de la curva de líquido saturado se encuentra la zona de líquido subenfriado, es decir, líquido que está a una temperatura menor que la que tendría si estuviera saturado a la misma presión.

Por otro lado, en un diagrama de presión y temperatura (Figura 3), la región de saturación toma la forma de una curva (o bien, se proyecta en una curva), llamada *curva de*

Valentín Valdés González, Carlos Álvarez Macías, Sergio Hernández Zapata saturación, esta es la curva que nos proponemos estudiar en este trabajo. Por otro lado, la línea triple se proyecta en un punto, llamado *punto triple*.

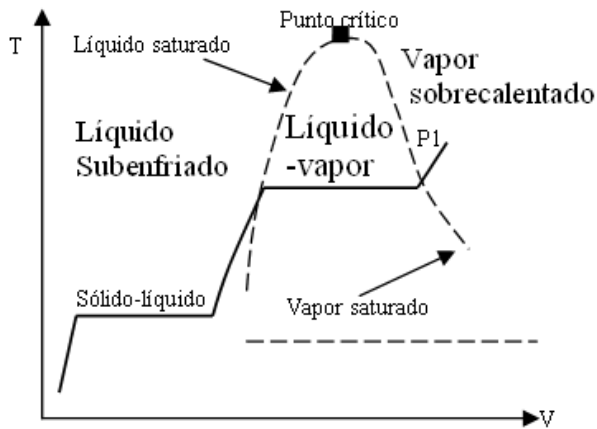


FIGURA 1. Diagrama de temperatura y volumen para una presión P_1 constante.

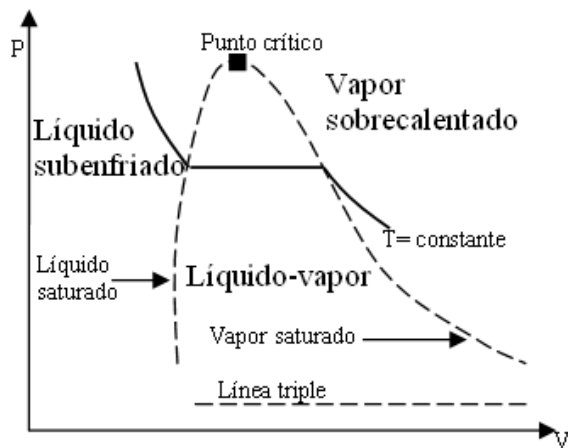


FIGURA 2. Diagrama de presión y volumen. La región de saturación está delimitada por la línea punteada. Con fines ilustrativos trazamos un proceso isotérmico (línea negra gruesa)

Diversos procesos pueden ser estudiados en el espacio de estados que representa la ecuación de estado. Por ejemplo, un proceso isobárico de una sustancia simple, pura y compresible, puede visualizarse por medio de una trayectoria, trazo grueso en negro P_1 , en el espacio de estados de equilibrio utilizando la temperatura, T y el volumen V como variables de estado (figura 1). Nótese que hay dos tramos del proceso en donde ocurre una transición de fase, cambio del estado de agregación de la sustancia. En estos tramos el proceso es también isotérmico, es decir, el calor transferido al sistema es utilizado para realizar la transición de fase y no para elevar la temperatura.

En un ambiente saturado las velocidades de evaporación, (tasa de moléculas que se separan de la fase líquida y se integran al vapor por unidad de tiempo), y de condensación, (la tasa correspondiente al proceso inverso), son iguales. En otras palabras, el sistema está en equilibrio en cualquier estado de la zona de saturación.

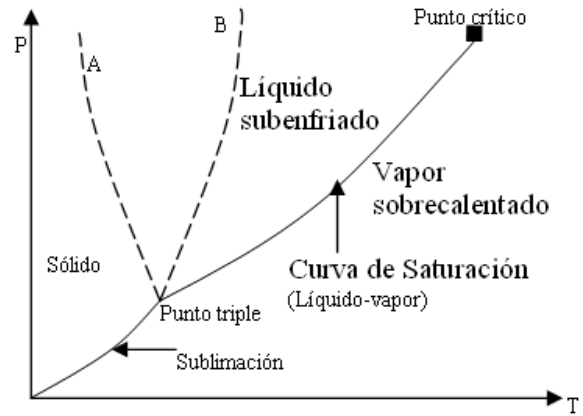


FIGURA 3. Diagrama de presión y temperatura. La curva A para fusión, corresponde a una sustancia que se expande al solidificarse como el caso del agua y la curva B, una sustancia que se contrae en la fusión.

La curva de saturación es muy importante en aplicaciones técnicas. Por ejemplo, en la refrigeración, ya que el refrigerante, que es la sustancia responsable de las transferencias de calor, está saturado dentro del evaporador de un refrigerador. Esto implica que al disminuir o aumentar la presión en el evaporador, disminuye o aumenta la temperatura a la cual el refrigerante líquido se vaporiza y, por lo tanto, podemos controlar de este modo la temperatura en la cámara refrigerante, donde están los alimentos o cualquier cosa que queramos enfriar (está es una de las grandes ventajas de la refrigeración moderna sobre la refrigeración primitiva en donde se utilizaba hielo y no se podía controlar la temperatura del refrigerante). [2, 3]

El estudio de las curvas de saturación es extremadamente importante no solo para las aplicaciones técnicas, como la que hemos mencionado, sino también para explicar diversos fenómenos atmosféricos como la formación de nubes en aire húmedo sobresaturado. Ilustraremos también este punto en el artículo con algunos experimentos demostrativos.

El objetivo de este trabajo es determinar la curva de saturación de alcohol etílico de uso comercial en un cierto rango de temperaturas. Intentamos, sin embargo, desarrollar un método que pueda servir para una sustancia en general, y de este modo estudiar empíricamente las propiedades de saturación.

A continuación describimos como está organizado el artículo. En la sección II exponemos primero, con fines de enseñanza, como se realizaría un experimento para medir la curva de saturación de alcohol etílico con material típico de un laboratorio de preparatoria. Después, explicamos cómo realizamos este experimento de una manera más rigurosa utilizando sensores de presión, sensores de temperatura y tarjetas de adquisición de datos. Esto ilustra también la importancia de ciertas técnicas para llevar a cabo mediciones de este tipo. En un experimento de Refrigeración Solar en el cual trabajamos se realizan ampliamente este tipo de procedimientos [6]. En la sección III exponemos los resultados obtenidos por nosotros y mostramos la aplicación directa de la curva obtenida, ya que caracteriza al alcohol como refrigerante utilizado en un

evaporador didáctico construido por nosotros. Para dejar claro la importancia del estudio de las curvas de saturación explicamos, en la sección IV, algunos experimentos didácticos que muestran que este tipo de estudio puede ayudar a comprender fenómenos muy comunes en nuestra vida diaria. Por último, en la sección V presentamos nuestras conclusiones.

II. MEDICIÓN DE LA CURVA DE SATURACIÓN DE ALCOHOL ETÍLICO

Describiremos a continuación dos montajes experimentales para medir las curvas de saturación de una sustancia, en nuestro caso, de alcohol etílico. El primer montaje está pensado para realizarse con el material típico de un laboratorio de preparatoria; matraces, tapones de goma, termopares, manómetros y se expone con fines didácticos. El segundo experimento, que fue realizado por nosotros (en el Taller de Fluidos del Sotano del Edificio Tlahuizcalpan, Facultad de Ciencias, UNAM, Ciudad de México), es el núcleo central de este trabajo y trata de exponer las técnicas típicas de un experimento controlado de Termodinámica con sensores profesionales, tarjetas de adquisición de datos y el uso de técnicas de computación para el tratamiento de los datos.

A. Primer Montaje experimental

El primer experimento para medir curvas de saturación se muestra en la figura 4, y consiste de un matraz con 100 ml de alcohol, un tapón de goma con dos orificios adaptados para introducir en este un manómetro digital y un termopar conectado a un multímetro respectivamente. Para calentar y de esta manera generar distintos puntos de la curva de saturación se utiliza una parrilla eléctrica.

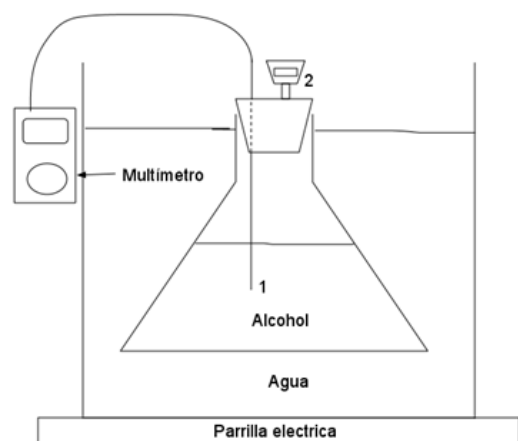


FIGURA 4. Dispositivo experimental consistente en un matraz sellado con un tapón con orificios para colocar un termopar (1) y un manómetro digital (2), dentro de un baño maría.

El primer procedimiento consiste en colocar una cierta cantidad de alcohol, en nuestro caso 100 ml dentro del

Obtención de las curvas de saturación de alcohol etílico

matraz destapado y colocar este en la parrilla con el objeto de producir la ebullición del alcohol a la presión atmosférica. Al hervir el alcohol, este desplaza hacia afuera el aire del interior del matraz (al estilo de los viejos experimentos de Física Recreativa de Perelman y Walker [4, 5]). Como esto último no ocurre instantáneamente esperamos un tiempo razonable hasta que suceda y entonces retiramos el matraz de la parrilla cerrándolo al mismo tiempo con su tapón, provisto ya del manómetro y del termopar para evitar todo tipo de fugas. Dejamos el sistema cerrado a la temperatura ambiente y entonces, cuando se vuelve a alcanzar el equilibrio, tenemos dentro del matraz alcohol líquido en equilibrio con su vapor, a la temperatura ambiente, pero a una presión menor que la atmosférica. La razón es que, al momento de cerrar el matraz, la presión del vapor de alcohol en el interior es igual a la presión atmosférica pero como el sistema está en contacto con el ambiente, a unos 20 °C en promedio, se enfría y parte del vapor de alcohol se condensa, lo que reduce la presión en el interior a la presión de saturación correspondiente a la temperatura final, la temperatura ambiental. Este es un experimento muy típico y puede servir para obtener de manera básica una sustancia pura con cierto grado de precisión. Tenemos así, preparado el sistema para empezar a medir la presión y la temperatura en diferentes estados de saturación. La temperatura varía desde la ambiente (unos 20 °C), hasta la temperatura de ebullición del agua, a la presión atmosférica a la altura de la Ciudad de México, (92 °C) debido a que el sistema es calentado dentro de un baño maría, lo cual nos permite cambiar la temperatura lentamente y garantizar que el sistema siempre esté en equilibrio. Empezamos entonces a calentar lentamente el matraz cerrado dentro del baño maría, preparado de la manera descrita, con ayuda de la parrilla eléctrica y vamos midiendo al mismo tiempo la temperatura por medio del termopar conectado a un multímetro digital UNI-T UT70B y la presión con un manómetro de laboratorio de enseñanza TIF Instruments (TIF9675), y se toma nota de los valores. Al final se realiza una gráfica de presión contra temperatura, *la curva de saturación del alcohol etílico*. El experimento, a pesar de sus dificultades debido a lo primitivo del método, se expone con fines didácticos ya que este es un trabajo de enseñanza y este procedimiento es muy típico de las clases de laboratorio en una preparatoria en donde no se dispone de tarjetas de adquisición y sensores más sofisticados para la medición.

B. Segundo Montaje experimental

En esta sección describimos una manera más profesional de realizar el experimento utilizando sensores de temperatura PT100 modelo PT-100-SS316-6-100-1/2"NPTM de la marca ingeco z.s. y de presión P51 modelo P51-500-A-MD-20mA, fabricado por *SSU Technologies*. Además se utilizan técnicas adecuadas a un control más riguroso y eficiente de las variables termodinámicas que aparecen en un experimento donde este tipo de mediciones son realizadas de manera habitual (por ejemplo, experimentos de refrigeración convencional y solar).

Vamos a describir en forma más precisa las características de los sensores de medición para que el procedimiento experimental sea lo más claro posible. En primer lugar describiremos el funcionamiento del PT100.

El PT100 consiste de una resistencia de platino que varía con la temperatura, esta es la característica central necesaria para su funcionamiento. Este sensor está calibrado por el fabricante de manera que cuando la resistencia es colocada en un reservorio a una temperatura de 0 °C el valor de la resistencia es $R_0=100\Omega$. La relación entre temperatura y resistencia se puede asumir lineal en un rango de temperaturas pero hay que considerar que las desviaciones no lineales fuera de este rango pueden ser muy importantes.

Generalmente se utiliza la relación dada por el fabricante [7],

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t). \quad (1)$$

Donde R_t es la resistencia a la temperatura t , R_0 es la resistencia a 0°C y $\alpha = 3.85 \times 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$

La ecuación (1), relaciona la resistencia de la sonda y la temperatura, a la que está sometida, en grados centígrados. Con fines de enseñanza, podemos hacer una calibración, independiente de la dada por el fabricante del PT100, haciendo un experimento controlado en donde se calienta agua y se deja enfriar en contacto con el medio ambiente (enfriamiento de Newton), o también, se puede usar algún otro procedimiento en donde cambie lentamente la temperatura de un reservorio en contacto con la sonda. Se mide, entonces, la temperatura con un termopar y la resistencia del PT100 para establecer una relación empírica entre ambas, que pueda ser comparada con la fórmula del fabricante. Sin embargo, desde un punto de vista más profesional y eficiente conviene utilizar un circuito en donde los cambios de resistencia de la sonda produzcan cambios en un voltaje entregado por el circuito (Figura 5). Un circuito eficiente y muy común, para obtener señales de voltaje, conocido como puente de Wheatstone, se muestra en dicha figura. Este experimento es particularmente conveniente cuando se requiere medir cambios de resistencias del PT100 del orden de décimas de ohm como es el caso. La razón principal para medir la temperatura con señales de voltaje es que estas señales pueden utilizarse por medio de una tarjeta de adquisición para estudiar el comportamiento de la variable bajo estudio, la temperatura en este caso, utilizando el software de una computadora.

El voltaje es lineal con la resistencia y por lo tanto depende también linealmente de la temperatura que queremos medir.

Lo que tenemos entonces, una vez construido el circuito, es un sistema que entrega valores de voltaje dependiendo de valores de la temperatura. Entonces construimos una gráfica de calibración que nos da este voltaje en términos de la temperatura medida tomada por el termopar conectado al multímetro. Esto nos permitirá medir la evolución de la temperatura en términos de la evolución de una señal de voltaje. Tenemos entonces caracterizado el sensor de temperatura PT100 y una manera adecuada para utilizarlo, con el equipo de un laboratorio más profesional.

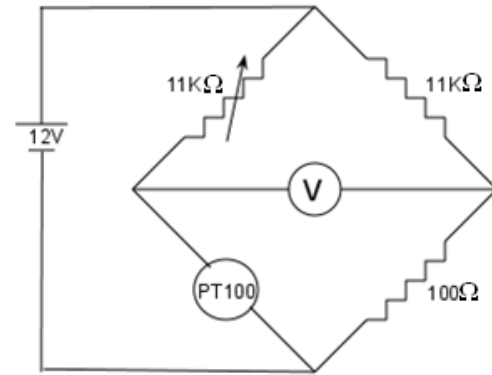


FIGURA 5. Circuito utilizado para obtener valores de voltaje y de temperatura. El círculo con una V representa al multímetro con el que se midió.

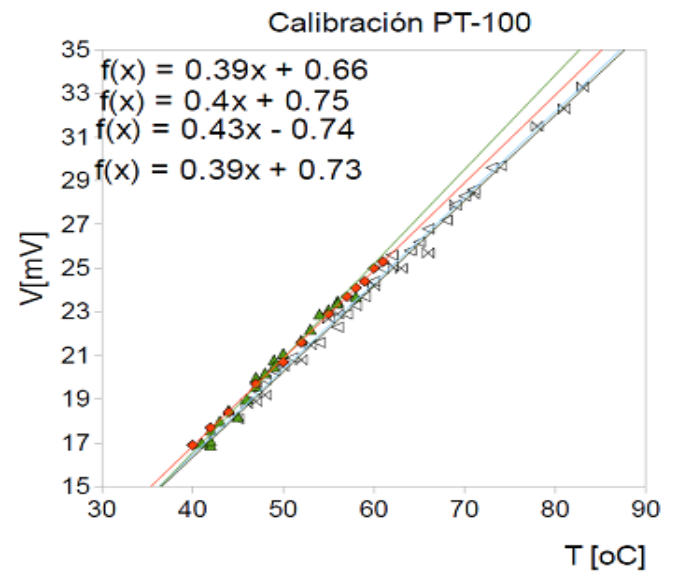


FIGURA 6. Gráfica de calibración del sensor PT100. El experimento se realizó cuatro veces y se tomó el promedio de los valores resultantes

Discutiremos ahora como se utilizan los sensores P51 para medir la presión del sistema. Estos sensores hacen uso del efecto piezoeléctrico, de forma que al variar la presión se produce un cambio en la corriente. La corriente generada se hace pasar por una resistencia de 100 ohms, y se mide la caída de voltaje en esta. Este es el voltaje que se mide y sirve para calibrar un sensor P51. Para realizar la calibración se utilizó una compresora en la que se midió la presión con un manómetro TIF Instruments (TIF9675) y se registró la variación del voltaje en el circuito que se muestra en la figura 7.

Además, debido a que la corriente de operación del P51 es del orden de 1mA, se genera una señal del orden de milivolts. Tenemos entonces que amplificar la señal para que la tarjeta de conversión analógico digital pueda registrar los datos. Los datos obtenidos se graficaron en la figura 8 para obtener la relación mostrada.

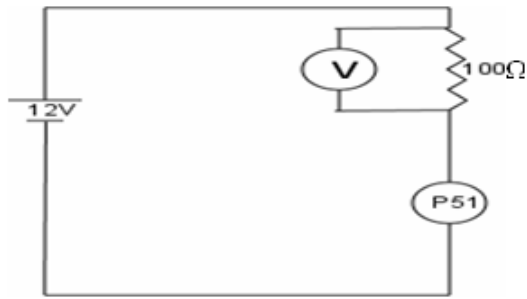


FIGURA 7. Circuito utilizado para obtener valores de voltaje y de presión para calibrar el sensor P51

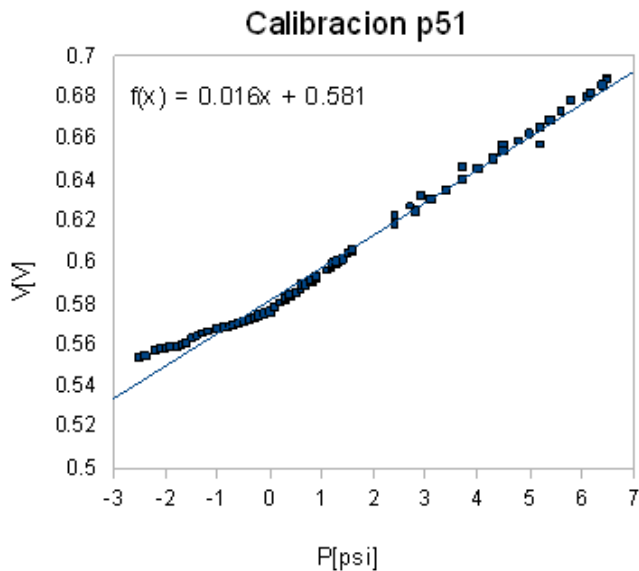


FIGURA 8. Gráfica de calibración del sensor P51. Los valores en psi se cambiaron posteriormente a Pascales.

Hemos terminado de describir como se utilizan los sensores, tanto de presión como de temperatura, necesarios para la medición. Pasaremos ahora a describir el dispositivo utilizado en la realización del experimento para medir la curva de saturación del alcohol etílico.

Se construyó un recipiente, figura 9, consistente de un tubo cilíndrico de aluminio, de 9 cm de diámetro y 35 cm de largo, provisto con tapas de aluminio en sus dos extremos. Un tubo de aluminio de 10 cm con cuerda fue soldado en cada tapa. En estas cuerdas, se colocaron dos válvulas de paso, esfera roscada, y a cada una de estas se le colocó un reductor para conectar en uno, el sensor de presión P51 y en el otro, ya sea un tapón o (como se verá adelante) una bomba de vacío. También se hizo un orificio con una cuerda de 1/2" en una de las tapas del recipiente, la misma donde se coloca el P51, para introducir el alcohol y luego conectar el PT100. En el transcurso del experimento se aplicó sellador en las juntas de las soldaduras para evitar fugas.

El recipiente, figura 9, tiene un volumen de 2.2 litros y se le introdujo un litro de alcohol comercial, etílico desnaturalizado. El procedimiento para introducir el alcohol fue el siguiente: Se cerró la válvula de paso indicada en la figura con el número 2 y se introduce el alcohol por el orificio 3, en donde se colocó enseguida el PT100.

Obtención de las curvas de saturación de alcohol etílico

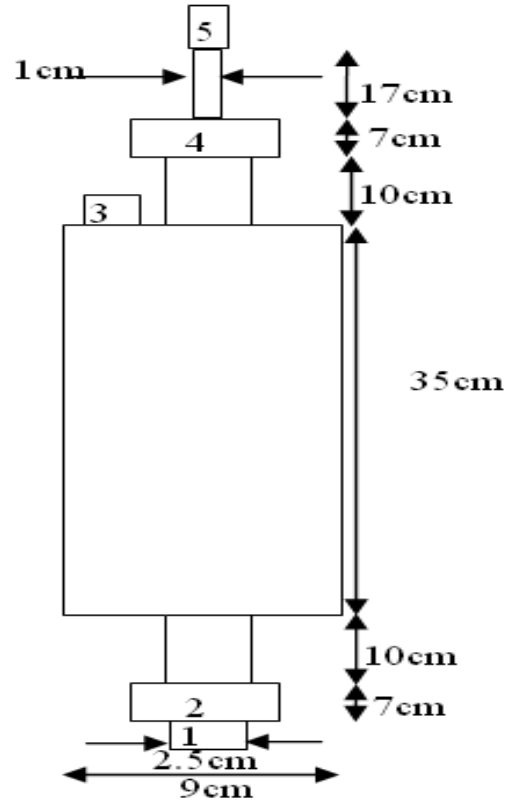


FIGURA 9. Dispositivo construido de forma cilíndrica con salida a una bomba de vacío (1) conectada con una manguera, válvulas de paso (2)(4), sensor de temperatura PT100 (3) y sensor de presión P51 (5)

Una vez con el alcohol dentro, se cerró la válvula de paso 4 y se volteó el recipiente (Nótese que el P51 está protegido del contacto con el líquido gracias a la válvula 4, estos sensores están diseñados para medir presión en contacto con un gas). A continuación, se abrió la válvula 2 para conectar la bomba de vacío (marca JB Industries, modelo DV-3E 3CFM) en la salida 1.

Cuando se enciende la bomba de vacío, el alcohol líquido empieza a hervir a la temperatura ambiente hasta que no queda aire en el interior del dispositivo. Logrado esto último, apagamos la bomba y tendremos alcohol puro donde el líquido está fuera de equilibrio con su vapor. Paulatinamente, se evapora líquido hasta que el líquido y el vapor están en equilibrio a la presión de saturación correspondiente a la temperatura ambiente. Una vez que se apaga la bomba de vacío se cierra la válvula 2, se retira la bomba y se coloca un tapón con rosca en su lugar. A continuación se regresa el dispositivo a su orientación original, con los sensores en la parte de arriba y se abre la válvula 4 para que el P51 vuelva a estar en contacto con el vapor de alcohol.

El dispositivo, cerrado con alcohol y provisto de los sensores PT100 y P51 para medir la temperatura y la presión respectivamente, es depositado en un tanque de plástico con agua, a la temperatura ambiente. Dentro de este tanque se coloca una resistencia de 1000W y 120V de operación para ir calentando el agua paulatinamente. Los dos sensores están conectados en la forma descrita antes, a sus respectivos circuitos y las dos señales de voltaje

Valentín Valdés González, Carlos Álvarez Macías, Sergio Hernández Zapata correspondientes son conectas a una tarjeta de adquisición de datos modelo NI-6009 de National Instruments, como se muestra en la figura 10. Es necesario, sin embargo, amplificar la señal proveniente del PT100, como señalamos antes.

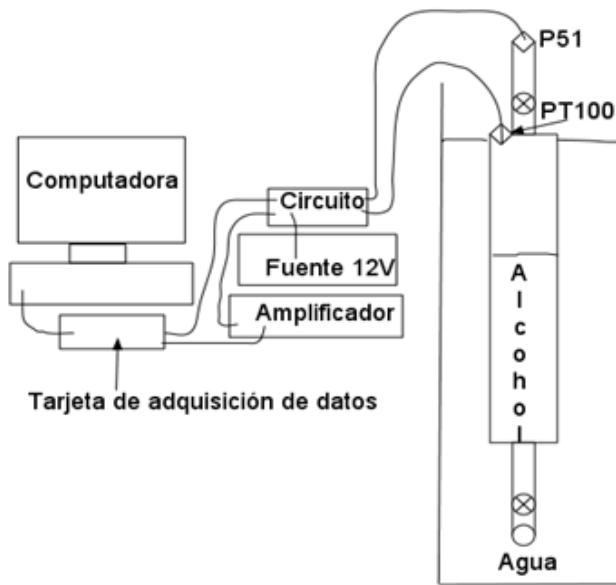


FIGURA 10. Dispositivo experimental usado para obtener la curva de saturación del alcohol etílico

El rango de temperaturas manejado en el experimento varió desde la temperatura ambiente hasta una temperatura de 60°C. Esto, debido a que la capacidad calorífica del agua es muy grande y se utilizó un tanque de 110 litros de capacidad, por lo que el experimento duró aproximadamente 10 horas y no se alcanzó la temperatura de ebullición del agua. Para ampliar el rango de temperaturas podemos introducir el dispositivo en un recipiente de mucho menor volumen y en lugar de empezar a medir a la temperatura ambiente añadir hielos para tener el sistema saturado a 0°C como punto de partida. Como el volumen de agua se reduce notablemente el tiempo para alcanzar la temperatura de ebullición del agua se reduce y podemos ampliar el rango en el cual estudiamos la curva de saturación de 0°C a 92°C, que es la temperatura de ebullición del agua en la Ciudad de México.

III. RESULTADOS DEL EXPERIMENTO

A continuación exponemos nuestros resultados. En primer lugar, a los datos crudos (señales de voltaje), una vez filtrados adecuadamente, se les aplicó la relación obtenida en la calibración respectiva, teniendo como resultado columnas con unidades de presión y temperatura respectivamente. Un último paso fue convertir las unidades a valores de presión y temperatura absolutas. Los datos obtenidos corresponden a un rango de 30 kPa y 35 K. El rango logrado fue porque el alcohol se calentó a partir de la temperatura ambiente de 22 °C (395 K), hasta los 57 °C (330 K). De esta forma la curva de saturación obtenida es la que se indica en la figura 11.



FIGURA 11. Curva de saturación que relaciona la temperatura con la presión de una sustancia pura (alcohol etílico)

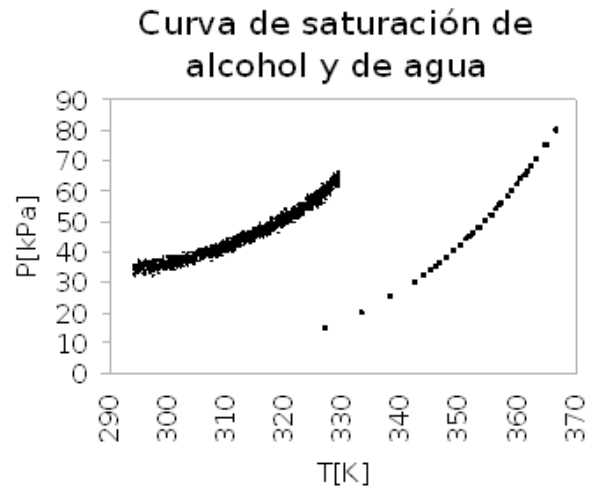


FIGURA 12. Comparación de la curva de saturación obtenida (izquierda), con una curva de saturación de agua (derecha), con datos obtenidos de [8]

En la comparación hecha en la figura 12 se observa como las dos curvas comparten características similares, como la concavidad hacia arriba y el hecho de que las dos son crecientes, pero podemos decir más, por ejemplo, a una misma presión, la temperatura de saturación en el alcohol es menor que en el agua, lo que explica porqué el alcohol hierve a una temperatura menor que el agua.

Una vez obtenida la información del alcohol, podríamos usarlo como un refrigerante dentro de un evaporador construido de manera sencilla, con fines didácticos. Un posible diseño es el mostrado en la figura 13.

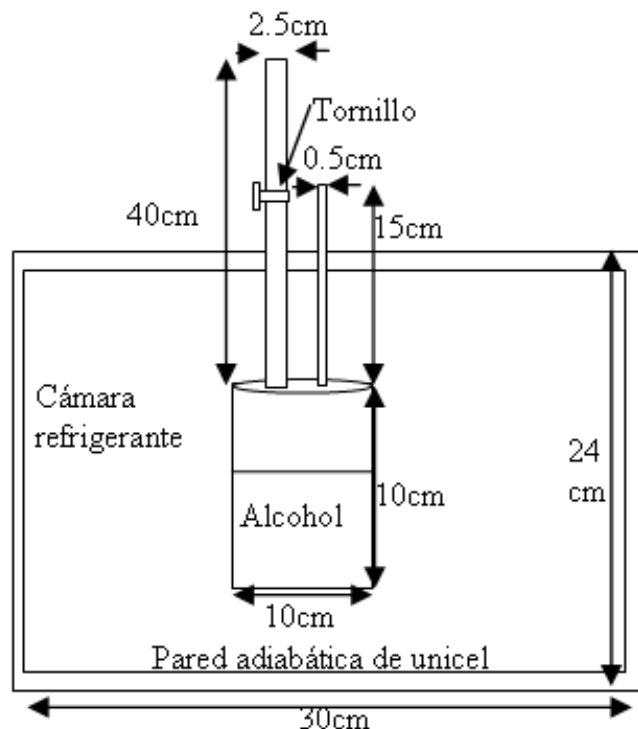


FIGURA 13. Diseño de evaporador para fines didácticos, usando tubos de diferentes diámetros y una hielera de unicel.

El evaporador mostrado en la figura 13 constaría de un tubo con diámetro de 10cm para depositar alcohol, uno de 2.5cm como salida para conectar una bomba de vacío y otro opcional de 0.5cm para introducir un termopar y medir la temperatura del refrigerante. La presión, en caso de que se quiera medir, podría hacerse en la salida de 2.5cm, con una conexión en T que también permita conectar la bomba de vacío. En el tubo de 2.5cm de diámetro se puede colocar un tornillo u otro dispositivo que sirva como válvula de paso y pueda controlar la presión. La cámara refrigerante, puede ser una hielera de unicel con un volumen aproximado de 12 litros.

De acuerdo con la curva de saturación obtenida, la presión necesaria para que hierva el alcohol a temperatura ambiente es de 30 kPa. Si se quiere lograr un descenso de la temperatura en la hielera de unicel, tendrá que lograrse una presión igual o menor a esta presión. Estas condiciones se pueden lograr adaptando una bomba de vacío como la utilizada en la sección II.

IV. EXPERIMENTOS DEMOSTRATIVOS: NÚCLEOS DE CONDENSACIÓN Y NUBES DE MEZCLA

En la sección anterior obtuvimos la curva de saturación del alcohol. No hay, en principio, ninguna razón por la cual el método experimental descrito no pueda utilizarse para estudiar las propiedades de saturación de muchas otras sustancias. Por ejemplo, en un proyecto de Refrigeración Solar en el que trabajamos es muy importante conocer las propiedades de saturación de diversas mezclas de amoníaco y agua (diversas proporciones) y los experimentos del tipo descrito en este artículo se vuelven muy relevantes.

Lo que nos proponemos hacer en esta sección es mucho más modesto, aunque consideramos que puede ser muy importante para una discusión pedagógica. Se trata de mostrar dos experimentos en donde el estudio de los sistemas cerca de la saturación aclaran mucho el fundamento de los fenómenos involucrados.

El primero tiene que ver con la formación de una burbuja en un ambiente sobresaturado de CO_2 en agua, por ejemplo una botella de Tehuacán (agua mineral comercial de venta en México). Cuando una botella de Tehuacán está cerrada, el dióxido de carbono disuelto en el agua está en equilibrio con el vapor de dióxido de carbono en la parte gaseosa de la botella. Cuando la botella se abre, el vapor de CO_2 escapa y el dióxido de carbono disuelto en el agua queda sobresaturado. Esta situación está fuera de equilibrio y se origina una tendencia a volver a la saturación por medio del surgimiento de burbujas de dióxido de carbono dentro del agua. Ahora bien, como esta sobresaturación no es muy alta es necesaria la presencia de núcleos de condensación para que las burbujas se formen efectivamente. Estos núcleos de condensación de burbujas son generalmente irregularidades presentes en las paredes del recipiente. Como puede verse la formación de burbujas no ocurre de manera homogénea en el cuerpo del líquido sino que se generan burbujas en lugares muy específicos, donde hay fisuras, por ejemplo.

Queremos hacer ver que incluso se pueden formar burbujas, por medio del mismo proceso, cuando se añaden partículas que sirven como núcleos de condensación, granos de sal de cocina en nuestro caso. En este experimento utilizamos 500 ml de agua mineral carbonatada y se dejan caer unos cuantos granos de sal en esta. Se puede introducir azúcar u otro tipo de partícula aunque no todas son igual de eficientes en el proceso [9, 10, 11]. La sal es muy eficiente debido a la ionización, proceso que aumenta el número de partículas que sirven como núcleos de condensación. El experimento se muestra en la figura 14.



FIGURA 14. Burbujas formadas por granos de sal en agua carbonatada.

Este experimento es muy interesante debido sobre todo a que el proceso es enteramente análogo al que da lugar a la formación de gotas de nubes en un ambiente de aire

sobresaturado de vapor de agua. Es decir, en este caso el aire tiene más vapor de agua del que tendría si estuviera saturado y por lo tanto está fuera de equilibrio. Aparece entonces una tendencia a regresar al equilibrio, la situación de saturación, por medio de la formación de gotas (el análogo de las burbujas de dióxido de carbono en nuestro experimento demostrativo). Como en los fenómenos atmosféricos usuales la sobresaturación no es muy alta es necesaria la presencia de partículas, sales u otras para que se formen buenas nubes, proceso enteramente análogo al proceso descrito arriba para las burbujas. Es por esto que Craig Böhren llama a su excelente libro de divulgación “Nubes en un vaso de cerveza” [9].

En un segundo experimento, también basado en [9], se colocaron 200 ml de agua en un matraz Kitasato y se colocó un tapón de goma para cerrar herméticamente el matraz. A continuación se calienta el agua dentro de este por medio de una parrilla eléctrica hasta que hierve. Si el vapor de agua no empezara a salir por la boquilla del matraz la presión aumentaría indefinidamente. Lo que ocurre entonces es que se genera un flujo de vapor hacia afuera del matraz a través de la boquilla de manera que la presión de vapor de agua dentro del matraz es siempre igual a la presión atmosférica. Tenemos entonces un flujo de vapor, a la presión atmosférica y a la temperatura de saturación del agua a esta presión, que se mezcla con el vapor de agua presente en el aire del ambiente. Observemos ahora la situación en una gráfica de presión P contra temperatura T donde se muestra la curva de saturación del agua, Figura 15. Curva que, por otra parte, puede ser obtenida por medio de un experimento muy similar al realizado en la sección II para obtener la curva de saturación del alcohol. El vapor de agua que sale de la boquilla del matraz Kitasato está saturado a la presión atmosférica a la altura de la Ciudad de México, donde se hizo el experimento, por lo que su estado termodinámico cae directamente sobre la curva de saturación del agua, en nuestro caso, $T=92^{\circ}\text{C}$ y P igual a la presión atmosférica a esta altura sobre el nivel del mar. Este vapor de agua, representado en la figura 15 por el punto B se mezcla con el vapor de agua presente en la atmósfera circundante, cuya presión es la presión parcial de éste vapor en la mezcla de aire y cuya temperatura es la temperatura ambiente. El estado termodinámico de éste último vapor está representado en la figura 15 por medio del punto C. Cuando estos dos vapores se mezclan se obtiene un estado termodinámico intermedio entre los dos, en el segmento de línea recta que une a los dos estados de equilibrio que representan a los dos vapores. Si tomamos como un punto representativo el punto medio del segmento vemos que este cae en la región líquida del diagrama por lo que se forman gotas debido a este proceso de mezclado y, por lo tanto, se forma una nube de mezcla en el aire a partir de que comienzan a mezclarse los dos vapores a unos pocos centímetros de la salida de la boquilla del matraz. Esta nube de mezcla tiene unos 30cm de alcance. Se puede pensar que, finalmente, el vapor de agua que sale del matraz se mezcla al final con todo el vapor de agua en el laboratorio por lo que la nube de mezcla es completamente inestable y desaparece rápidamente. Sólo cuando empieza el proceso de mezclado, cerca de la boquilla, la nube se observa nítidamente. Ahora bien, si con un encendedor calentamos

el vapor de agua a la salida de la boquilla y antes de que tenga lugar la mezcla, el estado termodinámico del vapor de agua resultante se mueve en la gráfica a la derecha, es decir, la presión permanece la misma, la presión atmosférica, pero la temperatura aumenta apreciablemente. Tenemos entonces vapor de agua representado en la figura 15 por el punto D que se mezcla con el vapor de agua inmerso en el aire en condiciones muy parecidas a la situación anterior, es decir, el punto C. El resultado de este proceso de mezclado puede ser representado por el punto intermedio del segmento de recta que une al estado termodinámico C con el D. Este estado cae en la región de vapor por lo que en estas circunstancias no se forma nube de mezcla. Las nubes de mezcla son un fenómeno muy recurrente en la vida cotidiana y es muy común observarlas en situaciones muy características. Por ejemplo, el aliento de una persona cuando hace mucho frío o a veces, la estela turbulenta dejada por un avión da lugar a una nube de mezcla que permite visualizarla [4].

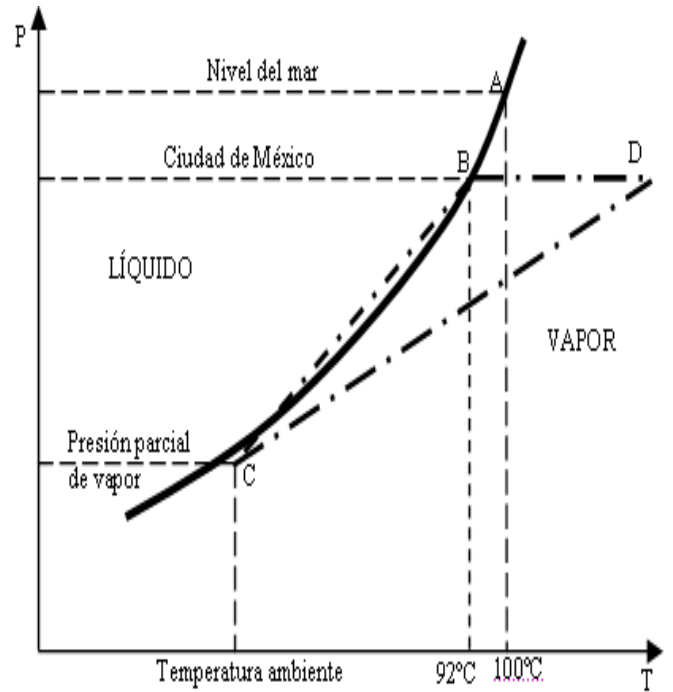


FIGURA 15. Diagrama que explica la aparición o no, de una nube. La trayectoria B-C pasa por una región líquida donde se forman la nube de mezcla y la trayectoria D-C pasa por una fase de vapor en la que no se observa este tipo de nube.

En la figura 16 aparecen dos fotos representando las dos situaciones descritas en este experimento demostrativo. Coincidimos con Böhren [9,10] en que los dos experimentos mostrados son particularmente interesantes para estudiar fenómenos atmosféricos y mostrar la importancia de las curvas de saturación.



FIGURA 16. En la figura de arriba si se forma nube. En la figura de abajo se calienta el vapor que sale de la boquilla y no la nube no se forma.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se obtuvo la curva de saturación de un alcohol etílico comercial de Farmacia. Para obtener la curva se indican dos procedimientos que se pueden seguir, uno es típico de escuelas de enseñanza media superior y el otro es un procedimiento más profesional y en el cual se utilizan sensores P51 y PT100. Los sensores utilizados se calibraron indicándose claramente el proceso que se siguió.

Se logró obtener la curva de saturación del alcohol en un rango razonable de temperaturas de 30 °C aún así se piensa continuar mejorando el experimento a fin de conseguir un rango de al menos 90°C para construir la curva de saturación.

Obtención de las curvas de saturación de alcohol etílico

Se planteó la construcción de un evaporador didáctico dentro de una cámara refrigerante, utilizando alcohol. Con la curva de saturación obtenida se muestra que a una presión inferior a los 30 kPa y temperatura ambiente el alcohol hierve. Usando el principio de refrigeración por evaporación, se puede mostrar el funcionamiento del evaporador en un refrigerador y lograr un enfriamiento perceptible en la cámara refrigerante.

Como parte final se llevaron a cabo dos experimentos sencillos, basados en el libro de Böhren [9] que dan cuenta de la utilidad de la curva de saturación no solo para explicar fenómenos de refrigeración, sino también para explicar fenómenos de carácter atmosférico como la formación de nubes.

REFERENCIAS

- [1] Schmidt, F. W., *Introduction to thermal science*, (John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, 1984).
- [2] Dossat, R. J., *Principios de refrigeración*, (CECSA, México, 1979).
- [3]http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Ref%20and%20Air%20Cond/New_index1.html. Consultado el 27 de Enero de 2007.
- [4] Perelman, Y., *Física recreativa* (Edit. MIR, 3ª ed., Moscú, 1975).
- [5] Walker, J., *La feria ambulante de la física*, (Limusa, México, 1979).
- [6]<http://refrigeracion.files.wordpress.com/2010/01/seminarios-tlahuizcalpan1.ppt>. Consultado el 27 de Enero de 2007.
- [7] <http://www.ingecoza.com/espan.html>. Consultado el 27 de Enero de 2007.
- [8]<http://www.spiraxsarco.com/mx/resources/steam-tables/saturated-water.asp> Consultado el 27 de Enero de 2007.
- [9] Böhren, C. F., *Nuvens numa caneca de cerveja*, (Gradiva Publicações, Lisboa).
- [10] Böhren, C. F., *Atmospheric Thermodynamics*, (Oxfordshire, Oxford, 1998).
- [11] Walker, J., *Amateur Scientist: Reflections on the rising bubbles in a bottle of beer*, Scientific American **245**, 172-178 (1981).