

ALGUNAS CONSIDERACIONES TEORICO-PRACTICAS SOBRE LA DESTILACION INTERMITENTE EN ALAMBIQUE SIMPLE DE MOSTOS FERMENTADOS, Y ORDINARIOS

Parte I: Algunas Definiciones y Conceptos fundamentales

Por Dr. José Ñíguez, ledezma.e.iniguez.consultores@gmail.com

RESUMEN

Este trabajo está dividido en tres partes. En la primera parte se presentan algunos conceptos fundamentales al campo de la destilación; se desarrollan las herramientas de conversión entre unidades de concentraciones molares, de masa, y de volumen; y finalmente se ajustan dos polinomios al intervalo de la curva de equilibrio etanol-agua relevante a la destilación de bebidas alcohólicas, situación que permitirá la integración analítica de la ecuación de Rayleigh y con ello hacer el proceso de generación de información mas simple y expedito que aquel que transita a través de la comúnmente usada evaluación gráfica de la referida integral. En la segunda y tercera partes seguimos, vía la ecuación de Rayleigh, la evolución de un mosto fermentado en la primera destilación y la de su destilado (ordinario) en la segunda. Allí se discuten los resultados obtenidos y se presentan las conclusiones respectivas.

DESCRIPTORES

Destilación intermitente, sistema agua-etanol, bebidas alcohólicas, ajuste polinómico de datos, curvas de equilibrio de fases, ecuación de Rayleigh.

ABSTRACT

This work is comprised of three parts. In the first one a number of fundamental concepts to the field are presented, the proper conversion tools between molar, mass, and volume concentrations are developed, and two polynomials adjusted to the interval of the ethanol-water equilibrium curve relevant to the distillation of alcoholic beverages. These polynomials allow the analytical integration of Rayleigh's equation and consequently a simpler and faster information generation than that provided by the commonly used graphical integration path. In the second and third parts the results obtained in regard to the distillation of the fermented must and low wines are reported, discussed, and the conclusions obtained, presented.

KEYWORDS

Batch distillation, water-ethanol system, alcoholic beverages, polynomial data fitting, curves of phase equilibrium, Rayleigh equation.

DESTILACION INTERMITENTE EN ALAMBIQUE SIMPLE DE MOSTOS FERMENTADOS, Y ORDINARIOS

PARTE I. ALGUNAS DEFINICIONES Y CONCEPTOS FUNDAMENTALES

PRESENTACIÓN

En relación al proceso de doble destilación que conducido en alambique simple transforma los mostos fermentados en bebidas alcohólicas, es posible encontrar en la literatura una aparentemente inconexa y arbitraria diversidad de criterios en relación al valor o valores que uno o más parámetros han de adoptar al momento idóneo de concluir la primera destilación, o de realizar los cortes de separación entre las fracciones comúnmente llamadas cabeza, corazón, y colas en la segunda destilación. Con objeto de determinar si estos criterios se refieren o no al mismo momento en la destilación, es que recurrimos al modelo teórico –la ecuación de Rayleigh- que la ingeniería química suministra para el análisis de la destilación en alambique simple, llamada también destilación diferencial. La integración de la ecuación de Rayleigh permite seguir paso a paso y con razonable precisión, la evolución que a lo largo de una destilación de este tipo experimentan tanto las cantidades como las concentraciones de la mezcla alcohólica en la olla o retorta de destilación, y el destilado colectado. La información así generada para un mosto fermentado en la primera destilación y para su destilado (ordinario) en la segunda destilación es aquí contrastada con la diversidad de criterios antes referida. La conclusión obtenida es que estos criterios, aparentemente sin relación alguna, representan perspectivas diferentes del mismo momento en la destilación, y por tanto son equivalentes.

El trabajo se ha dividido en tres partes. En la primera parte se presentan algunos conceptos fundamentales al campo de la destilación; se desarrollan las herramientas de conversión entre unidades de concentraciones molares, de masa, y de volumen; y finalmente se ajustan dos polinomios al intervalo de la curva de equilibrio etanol-agua relevante a la destilación de bebidas alcohólicas, situación que permitirá la integración analítica de la ecuación de Rayleigh y con ello hacer el proceso de generación de información mas simple y expedito que aquel que transita a través de la comúnmente usada evaluación gráfica de la referida integral. En la segunda y tercera partes seguimos, vía la ecuación de Rayleigh, la evolución de un mosto fermentado en la primera destilación y la de su destilado (ordinario) en la segunda. Allí se discuten los resultados obtenidos y se presentan las conclusiones respectivas.

1.1 Mosto Fermentado

Es la condición alcohólica final adquirida por una mezcla fundamentalmente de agua y azúcar (es) en virtud de la transformación de ésta última en alcohol etílico por la acción de levaduras.

Los azúcares referidos -entre los que podemos enumerar la glucosa, fructosa, sacarosa o maltosa- pueden provenir de productos como la uva, manzana, pera, cereza, fresa, ciruelas,

membrillo, caña de azúcar, entre otros; o bien, previa hidrólisis del almidón o la inulina en ellas contenida, de gramíneas como la cebada, trigo, maíz, centeno, y arroz; de tubérculos como la papa; o de suculentas como el agave. Es la destilación de los mostos fermentados de estas plantas lo que produce las bebidas espirituosas conocidas como coñac, brandy, whisky, sake, ron, vodka, tuica, pisco, cuxa, tequila, mezcal, bacanora, etc. En los mostos fermentados destinados a destilación son comunes las concentraciones del 7% al 12% de alcohol en volumen (%v)

1.2 Destilación

Es el proceso físico que separa, concentra, y/o purifica en mayor o menor grado los componentes de una mezcla líquida en base a sus diferentes puntos de ebullición o presiones de vapor. En esencia el proceso depende de la posibilidad de generar vía ebullición, una fase vapor de composición diferente a la de la fase líquida. La condensación de esta fase vapor produce una fase líquida enriquecida en el o los componentes más volátiles de la mezcla original. A fin de tener una idea mas precisa de la destilación tal cual toma lugar en un alambique simple, nos referiremos a diagrama de equilibrio para el sistema etanol-agua a presión atmosférica, mostrado de manera aproximada en la figura 1.1.

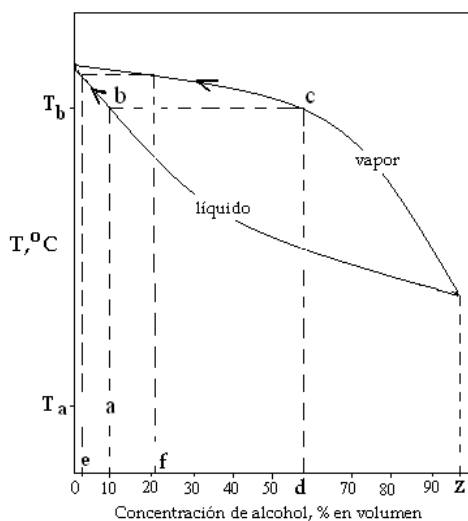


Figura 1.1. Representación aproximada del diagrama de equilibrio para el sistema etanol-agua a presión atmosférica. Diagramas de este tipo, conocidos también como diagramas de punto de ebullición, permiten conocer las concentraciones de la fase líquida y vapor a alguna de las temperaturas de equilibrio. El punto z corresponde al azeótropo agua-alcohol. En este punto la destilación deja de ser un proceso de separación ya que la fase líquida y vapor tienen la misma composición.

Este diagrama nos permite conocer la concentración del vapor de equilibrio generado por la ebullición de una mezcla de composición dada, o bien la del líquido de equilibrio producido por la condensación de un vapor de composición determinada. Supongamos - tal y como ha sido representado en la figura 1.1 mediante el punto a - que tenemos una mezcla etanol-agua de concentración alcohólica igual al 10% en volumen, a temperatura T_a y presión

atmosférica. Vía calentamiento a presión constante, esta mezcla alcanzará eventualmente su punto de ebullición b a la temperatura de T_b . En el diagrama bajo consideración este punto se localiza en la intersección entre la curva de equilibrio correspondiente al líquido, con la vertical trazada desde el punto que representa la concentración de la mezcla bajo consideración. Las características del primer vapor generado por la ebullición de esta mezcla son las que corresponden al punto c , localizado en la intersección de la curva de equilibrio de la fase vapor, con la horizontal trazada desde el punto b . Esto quiere decir, primero, que el vapor generado, como corresponde a un vapor de equilibrio, aparece a la temperatura de ebullición de la mezcla, y segundo, que su composición es la indicada por el punto d de la escala respectiva. Si este vapor se separa de la mezcla líquida y se sujeta a condensación total, dará lugar a un líquido de idéntica composición a la del vapor, que como puede verse de la figura 1.1 es de aproximadamente 60% en volumen de alcohol, y como tal mas rica en este componente que la mezcla de la cual proviene. A consecuencia de la generación de la fase vapor descrita, la concentración alcohólica de la mezcla líquida disminuye y por lo tanto su nueva concentración se localiza ahora a la izquierda de la concentración original. Si la ebullición se sostiene en esta nueva condición, la concentración alcohólica de la fase vapor generada ahora será menor a la de la fase vapor anteriormente discutida. A consecuencia de la generación de esta última fase vapor encontraremos a la mezcla líquida con una concentración alcohólica menor aún a las dos anteriores, de forma que el vapor por ella generado es también mas pobre en alcohol que los vapores anteriores, y así sucesivamente. Al transcurrir la destilación bajo estas condiciones observaremos por un lado que mientras decrece la cantidad de mezcla destilando, crece la de destilado, y por la otra que las concentraciones tanto de mezcla como del destilado, decrecen. Esta última consideración es la que indican las puntas de flecha adicionadas a la figura 1.1. Si el punto final de la destilación fuera una mezcla de concentración como la representada por el punto e , entonces la concentración del último vapor generado sería la del punto f , y la concentración promedio del destilado colectado correspondería a algún valor acotado por las concentraciones d y f .

Dado que el destilado obtenido de un mosto fermentado tiene una concentración alcohólica del orden de 25% en volumen -un valor bajo para bebidas alcohólicas destiladas- y de la necesidad de purificar aún mas el producto de esta primera destilación – denominado comúnmente *ordinario*-, es que se somete este a una segunda destilación de mecánica similar a la antes expuesta, en la que la purificación consiste en seccionar o partir el destilado en tres fracciones: cabeza, corazón y colas. Los compuestos indeseables en el producto final se captarán mayormente en las fracciones denominadas cabeza y colas. La fracción corazón, a la sazón el producto principal, constituido principalmente por alcohol en concentraciones de 60 a 70% en volumen, agua y cantidades pequeñas de algunos constituyentes de cabezas y colas, es el que eventualmente habrá de llegar al consumidor.

1.3 El alambique simple

El alambique es considerado el dispositivo más antiguo usado tanto para la destilación de mostos fermentados, como de esencias vegetales [1.1, 1.2]. Los componentes de una instalación típica de destilación basada en alambique simple se muestran en la Figura 1.2. Identificamos allí con el número (1) a la fuente de calor, horno, o fogón, que vía la

combustión de leña o de gas (en ocasiones mediante el uso de vapor circulando a lo largo de serpentines dentro de la olla) proporciona el calor para producir y sostener la ebullición del mosto fermentado, previamente cargado en la olla, retorta, o caldero (2). Los vapores generados son conducidos a través del brazo (3) hacia el serpentín donde son finalmente condensados gracias al enfriamiento que experimentan al ponerse en contacto con el agua fría circulando por el condensador (4), donde el serpentín de condensación se encuentra inmerso. Los vapores condensados y enriquecidos en el componente más volátil salen del serpentín y pasan entonces por el dispositivo conocido como ‘probeta’ (5), para ser finalmente descargados en el recipiente colector de destilado (6). El número (7) representa al termómetro que indica la temperatura en la así llamada cámara de vapor y que representa una variable importante en cuanto a la conducción de la destilación a la velocidad adecuada, así como en la terminación del corte corazón en la segunda destilación.

Figura 1.2. Alambiques simples de la destilería Loch Ewe, Aultbea, Escocia.



Fuente. La fotografía es usada con permiso de www.lochewedistillery.co.uk/distillery.htm

La probeta, conocida en francés como ‘eprouvette’, en inglés como ‘parrot’, y en portugués como ‘pico de papagayo’, consiste en una probeta –usualmente de cobre- con un alcoholímetro inmerso en ella y que permite al destilador conocer la concentración alcohólica del destilado al momento de abandonar el serpentín. La fotografía de un tipo de probeta se muestra en la figura 1.4 [1.3].

El alambique simple de cobre es usado en la producción de algunas de las bebidas mas finas y reconocidas en el mundo como los son el coñac y el Armagnac. Algunas industrias tradicionalmente ligadas al alambique de cobre han cedido a presiones del mercado y optado por recipientes de acero inoxidable. Una modificación del alambique simple consiste en dotarlo de una columna de rectificación capaz de llevar a cabo en un solo paso, mediante la adecuada operación del equipo, las dos destilaciones que habremos aquí de discutir, o aún las tres destilaciones comunes a algunos whiskeys irlandeses. La columna de rectificación mencionada adiciona dos, tres, o mas platos, cada uno de ellos equivalente –al menos en principio- al efecto de un alambique simple. Si bien puede argumentarse que estos equipos son más eficientes, esta eficiencia se logra a cambio de una inversión inicial más elevada, de una sensible pérdida en la facilidad de la operación, y quizás mas importante, de una modificación en la relación alcohol/agua/congéneres con una

correspondiente repercusión en las características organolépticas del destilado. Habría que añadir aquí que los principios de ingeniería química que gobiernan esta modificación son radicalmente diferentes a los del alambique simple. Las discusiones a presentarse en estos trabajos –enfaticamos- se refieren única y exclusivamente a la destilación en alambique simple.

Haremos notar aquí que en la descripción que en la sección 1.2 se hizo de la destilación simple o diferencial, están implícitas una serie de consideraciones que son asimiladas como supuestos fundamentales del modelo –la ecuación de Rayleigh - que suministra la ingeniería química para el análisis teórico de este tipo de destilación. Estas consideraciones son las siguientes [1.4]: Que todo vapor que abandona el líquido en la olla lo hace en condiciones de equilibrio con este. Esta condición es de hecho la que da la característica de ‘ideal’ a la destilación descrita ya que para satisfacerla se requiere que la destilación proceda con infinita lentitud; Que la condensación toma lugar única y exclusivamente en el condensador. Esta condición se puede re-expresar diciendo que la destilación se lleva a cabo sin reflujo, es decir, sin retorno a la olla de porción alguna de destilado; y finalmente, Que las mezclas o cargas a destilar en el proceso de elaboración de bebidas alcohólicas pueden tratarse como si fueran mezclas de etanol y agua. No obstante el argumento de que esta última suposición puede calificarse de razonable en virtud de la pequeña concentración de la mayoría de los compuestos diferentes de alcohol y agua –los así llamados congéneres- presentes en las cargas a destilar, justo es reconocer que la mecánica operativa consistente en separar el producto de la segunda destilación en tres fracciones o cortes –llamados comúnmente cabezas, corazón y colas – obedece en parte, a la presencia de estos compuestos. No obstante el hecho de que uno o más de los supuestos mencionados no correspondan a lo que es posible o realizable en la práctica, el análisis teórico basado en este modelo es sin embargo capaz de suministrar un marco de referencia de precisión razonable con el cual comparar la operación real. Al respecto mencionaremos que un estudio reciente llevado a cabo en la Destilería Bruichladdich, Escocia, concluyó que en general la información experimental proveída por muestras tomadas del proceso de destilación, muestran buena concordancia con las predicciones teóricas anticipadas de la curva de equilibrio agua-etanol [1.5].

1.4 Los congéneres

Precisemos ahora que el mosto fermentado cargado a la olla es en realidad una mezcla compleja en la que aparte de agua y alcohol encontramos una gran variedad de compuestos químicos - la mayoría en pequeñísimas cantidades - generados principalmente durante la fermentación. Todo otro compuesto químico diferente de agua y alcohol presente en el mosto durante la destilación, es conocido como congénere [1.6]

Algunos congéneres comunes [1.6-1.8], acompañados de sus puntos de ebullición (en grados Celsius) se enlistan a continuación. Para efectos de referencia se incluyen en la lista el etanol y el agua: etanol (20.2), acetona (56.5), metanol (64.7), acetato de etilo (77.1), *etanol* (78.4), 2-propanol (82), 1-propanol (97.1), *agua* (100), isobutanol (108), 1-butanol (117.7), ácido acético (117.9), 2-metil-1-butanol (125.7), 1-pentanol o alcohol amílico (131.2), 3-metil-1-butanol (131.2), lactato de etilo (151), furfural (161.7), octanoato de etilo (206), decanato de etilo (241). En la jerga de la destilación de productos alcohólicos

potables es común designar a los alcoholes superiores (de más de dos átomos de carbono) como aceite de fusel. Para darnos una idea de la complejidad del tema diremos que se han estimado en alrededor de 500 los diferentes compuestos químicos presentes en los whiskys escoceses, reiterando, la mayoría en pequeñísimas cantidades, de los cuales se estima en 400 los que contribuyen al sabor del mismo. Sin embargo, y no obstante la herramienta analítica moderna a disposición de los investigadores, no ha sido posible construir una receta básica común a las mejores marcas de este producto [1.9].

Figura 1.3. Alambiques de cuello de ganso de la destilería Benromach, Escocia.



Fuente: La fotografía es usada con permiso de: www.undiscoveredscotland.co.uk

Es preciso decir aquí que el número de congéneres en un mosto a destilación, así como su proporción relativa, son función de una variedad de factores como el origen del mosto – uva, manzana, pera, cebada, maíz, agave, etc.-, las condiciones de fermentación – temperatura, duración, pH, condiciones sanitarias de la misma, etc.-, y del tipo de levadura usado, entre otros. Discusiones interesantes sobre la evolución que la concentración de los principales congéneres experimenta a lo largo de la destilación pueden encontrarse en [1.7, 1.8].

Como puede observarse del listado arriba anotado, existen congéneres más volátiles que el etanol (de menor punto de ebullición), de volatilidad intermedia entre el etanol y el agua, y menos volátiles que el agua. Con esta consideración como base podemos describir, de manera aproximada y muy simplificada, lo que sucede en una doble destilación en alambique simple. Al cargar el mosto fermentado a la olla (digamos de un 10% en volumen de alcohol), cargamos etanol, agua y los grupos de congéneres antes descritos. Al final de la primera destilación –que usualmente se realiza sin cortes- encontraremos que el remanente en la olla consiste mayormente de agua –aproximadamente el 60% en masa del agua originalmente presente en la olla- acompañada de una pequeña cantidad de alcohol y la mayor parte de los congéneres de menor volatilidad que el agua. El destilado por su parte – el ordinario- consiste también mayormente de agua – aproximadamente el 40% en masa del agua en el mosto fermentado-, la mayor parte del alcohol, y también la mayor parte de los congéneres restantes. Esta mezcla es la que se carga a la olla en la segunda destilación. El destilado generado será ahora recibido en tres recipientes diferentes. La primera fracción, comúnmente llamada cabeza, está constituida, en orden de cantidad, por alcohol, agua y los congéneres más volátiles. Aunque de proporción menor al alcohol y al agua, los congéneres

volátiles en esta fracción representan la mayor proporción de aquellos contenidos en el ordinario. La segunda fracción, llamada comúnmente corazón, -la fracción que habrá de convertirse en bebida alcohólica-, constituida mayormente por alcohol y agua, adiciona a su composición pequeñas cantidades tanto de congéneres mas volátiles como de menos volátiles que el alcohol. En la jerga de la destilación artesanal se dice que la fracción corazón adiciona cabezas tardías y colas tempranas [1.10]. El hecho de que estos congéneres encuentren cabida en la fracción corazón es el sello característico de la destilación en alambique, y también el responsable de las características organolépticas peculiares a las diferentes bebidas alcohólicas. El particular aroma, sabor y bouquet de estas es una consecuencia de la presencia de pequeñas cantidades de cabezas y colas en el corazón. La tercera fracción, las colas, constituida mayormente de agua y alcohol, lleva consigo la mayor proporción de los congéneres menos volátiles que el alcohol. A efectos de recuperar parte del alcohol por ellas contenido, las fracciones cabeza y colas son usualmente recirculadas mezclándolas con el siguiente ordinario. El remanente en la olla tanto de la primera como de la segunda destilación es descartado [1.11].

Figura 1.4. Probeta [Pico de Papagayo (Portugal), Eprouvette (Francia), Parrot (Estados Unidos)] para medición del grado alcohólico del destilado saliendo del condensador.



Fuente: La fotografía es usada con permiso de <http://www.copper-alembic.com/>

Entre las bebidas alcohólicas destiladas en alambiques simples encontramos al coñac, a los whiskys escoceses conocidos como de una sola malta (single malt, en inglés), a cierto número de brandis españoles y whiskys americanos, a la tuica Rumana, ligados por tradición a la destilación en alambiques simples de cobre [1.12-1.15]; a los mezcales de algunas regiones de Oaxaca (México) cuya tradición demanda la destilación en alambique simple de barro (mezcal minero) [1.16]; y a la destilación de la tradicional bebida del noroeste mexicano (específicamente del estado de Sonora) llamada Bacanora, recién reglamentada por el gobierno de ese país, que parece se desarrolla alrededor de alambiques simples de acero inoxidable [1.17].

Existen otra serie de bebidas alcohólicas producidas a partir de lo que se llama espíritu neutro que viene siendo alcohol etílico de alta pureza y cuya producción demanda el uso de columnas de rectificación. El espíritu neutro es –por definición- un producto insípido. La producción de bebidas alcohólicas con base en espíritu neutro requiere de etapas adicionales a fin de proporcionarle el sabor deseado. Esta operación es común en la elaboración de vodka y ginebra.

1.5 Grado Alcohólico

El grado o concentración alcohólica de las bebidas se expresa estableciendo su porcentaje de alcohol en volumen a 20° C. Esta unidad de medida forma de hace tiempo parte de los estándares comerciales alrededor del mundo. Veamos por ejemplo la definición de grado alcohólico volumétrico del bloque comercial llamado MERCOSUR: *Es la cantidad de ml. (mililitros) de alcohol etílico anhidro en 100 ml. (cien mililitros) del producto considerado, siendo ambos volúmenes determinados a la temperatura de 20° C (veinte grados CELSIUS). Será expresada en porcentaje en volumen (% Vol.)* [1.18].

Si bien el comercio de bebidas alcohólicas, su tasa impositiva, y en aspectos mas ligados a esta discusión, el momento de concluir la primera destilación, como el de realizar los cortes asociados a la segunda destilación, están determinados en base al grado alcohólico volumétrico, encontramos, por otra parte, que la descripción termodinámica así como la ingeniería química de los procesos de destilación se ofrece en términos de fracciones molares, y por si esto fuera poco encontramos también que parte de la información relevante asociada a estas consideraciones, por ejemplo las densidades de mezclas de agua y alcohol etílico se presentan en términos de fracciones masa. Es debido a estas consideraciones que antes de emprender cualquier discusión cuantitativa referente a la destilación de bebidas alcohólicas, debe contarse con herramientas confiables de conversión entre estas escalas. Al respecto se puede decir que la conversión entre fracciones molares y fracciones masa no representa mayor complicación. Por ejemplo, la conversión de fracciones masa a fracciones molares puede obtenerse tomando como base de cálculo 1 gramo de una mezcla etanol-agua en la que la concentraciones de estas especies, medidas en fracción masa, son w y $1-w$ respectivamente. Si M_1 y M_2 , en $g/g\ mol$, representan las masas molares de etanol y agua tendremos entonces que la fracciones molares de etanol (x) y agua ($1-x$) en esa mezcla serán, respectivamente, las siguientes

$$x = (w/M_1)/[(w/M_1) + ((1-w)/M_2)] \quad (1.1)$$

$$1-x = ((1-w)/M_2)/[(w/M_1) + ((1-w)/M_2)] \quad (1.2)$$

Si es la concentración en fracción molar la que se conoce, podemos pasar a fracciones masa tomando como base de cálculo un $g\ mol$ de mezcla. De esta manera las fracciones masa de alcohol y agua serán, respectivamente, las siguientes

$$w = (xM_1)/[xM_1 + (1-x)M_2] \quad (1.3)$$

$$1-w = [(1-x)M_2]/[xM_1 + (1-x)M_2] \quad (1.4)$$

La conversión entre fracción molar o fracción masa, y fracción volumen, no representa mayor problema para aquellos componentes que forman soluciones ideales, una de cuyas características es que el proceso de mezclado no altera los volúmenes iniciales de los componentes de la mezcla. Las mezclas de benceno y tolueno proceden de esta manera. Al mezclar, digamos a 20° C [ver nota 1.18], 40 ml de benceno y 60 ml de tolueno, se obtienen 100 ml de mezcla de 40%v de benceno y 60%v de tolueno. Haremos notar que en el presente trabajo la fracción volumen será representada como v , y el porcentaje en volumen %v. Si M_b , M_t , ρ_b , y ρ_t representan, respectivamente, las masas molares ($g/g\ mol$) y

densidades ($g\ cm^{-3}$) de benceno y tolueno (estas últimas a las condiciones antes anotadas), entonces los cocientes M_b/ρ_b y M_t/ρ_t producen, respectivamente, los volúmenes molares de benceno puro ($V_{m,b}\ cm^3/g\ mol$) y tolueno puro ($V_{m,t}\ cm^3/g\ mol$). En términos de estos volúmenes molares podemos tomar como base de cálculo un mol de mezcla ideal con fracción molar de benceno x , y expresar la fracción volumen de la misma como sigue

$$v_b = (xV_{m,b})/[xV_{m,b} + (1-x)V_{m,t}] \quad (1.5)$$

$$v_t = 1 - v_b = [(1-x)V_{m,t}]/[xV_{m,b} + (1-x)V_{m,t}] \quad (1.6)$$

Los denominadores de los cocientes anteriores representan al volumen molar real de la mezcla de la composición indicada $V_{m,r}\ cm^3/g\ mol$, es decir

$$V_{m,r} = xV_{m,b} + (1-x)V_{m,t} \quad (1.7)$$

La realidad, sin embargo, es que la mayoría de las mezclas son no-ideales y como tales proceden sin que se de la aditividad de volúmenes antes indicada. Sucede así que al mezclar a $20^\circ C$, $760\ cm^3$ de alcohol etílico y $400\ cm^3$ de agua no obtenemos $1160\ cm^3$ de mezcla, sino $\sim 1120\ cm^3$. Al producirse una mezcla no ideal, como la de agua y etanol, los volúmenes de los componentes sufren modificaciones dando como consecuencia que sus volúmenes ya *en la mezcla* sean diferentes de los volúmenes originales. La aditividad es así rota y la ecuación (1.7) no refleja la situación real. En el caso de soluciones no-ideales se puede obtener una estimación cercana tanto de los volúmenes de los componentes en la mezcla, como del volumen total de la misma, a través de los volúmenes parciales molares de etanol y agua, \bar{V}_1 y \bar{V}_2 respectivamente, en $cm^3/g\ mol$. La cercanía de la estimación al valor real será función del error experimental incurrido en la determinación de los volúmenes parciales molares. Para el caso de mezclas etanol-agua estas estimaciones, referidas a un mol de mezcla con fracción molar de etanol x , serían, respectivamente, las siguientes

$$\text{Volumen de etanol en la mezcla: } x\bar{V}_1 \quad (1.8)$$

$$\text{Volumen de agua en la mezcla: } (1-x)\bar{V}_2 \quad (1.9)$$

$$\text{Volumen molar de la mezcla: } V_{m,r} = x\bar{V}_1 + (1-x)\bar{V}_2 \quad (1.10)$$

Las fracciones volumen de etanol y agua estarían entonces definidas como sigue

$$v = (x\bar{V}_1)/[x\bar{V}_1 + (1-x)\bar{V}_2] \quad (1.11)$$

$$1 - v = [(1-x)\bar{V}_2]/[x\bar{V}_1 + (1-x)\bar{V}_2] \quad (1.12)$$

Debemos enfatizar aquí el hecho de que los volúmenes parciales molares son función de la concentración, es decir sus valores cambian al cambiar la composición de la mezcla bajo consideración. Los volúmenes parciales molares a substituir en las ecuaciones (1.8), y (1.9) deben ser precisamente los que correspondan a la concentración de la solución de interés. Notaremos también, tal y como indica la comparación de las ecuaciones (1.7) y (1.10), que en el caso de mezclas no-ideales los volúmenes parciales molares toman el papel que en las

mezclas ideales juegan los volúmenes molares de los componentes puros.

En la teoría termodinámica el volumen parcial molar de un componente en una mezcla de temperatura y presión determinadas encuentra definición precisa en términos de una expresión diferencial parcial que en esencia cuantifica la razón o tasa de cambio del volumen de una solución cuando a la misma se añade un mol de ese componente bajo condiciones de temperatura, presión y composición constante. Por razones de brevedad, sin embargo, tomaremos aquí al volumen parcial molar como una especie de ‘volumen corregido’ que al ser substituido en las expresiones (1.8), (1.9) y (1.10) proporciona los valores correctos para los volúmenes de los componentes y el de la mezcla. El lector interesado podrá encontrar discusiones detalladas de los volúmenes parciales molares en textos de termodinámica o fisicoquímica [1.19].

Las consideraciones anteriores permiten concluir que a efecto de poder establecer tablas o gráficas de conversión entre las fracciones molares o fracciones masa, y la fracción volumen, para mezclas etanol-agua a 20°C, es necesario disponer de una tabla de volúmenes parciales molares contra composición. Afortunadamente pudimos localizar en la literatura una serie de valores a esta temperatura [1.20], mismos que se muestran en las primeras tres columnas de la tabla 1.1. Allí los volúmenes parciales molares de etanol y agua, \bar{V}_1 y \bar{V}_2 respectivamente, se anotan en $cm^3 / g mol$.

Tabla 1.1. Cálculos de la fracción volumen de las mezclas de etanol-agua

x	\bar{V}_1	\bar{V}_2	$x\bar{V}_1$	$(1-x)\bar{V}_2$	$V_{m,r}$	v	$V'_{m,r}$	%E	w
0.100	53.10	18.11	5.31	16.30	21.61	0.246	21.57	0.18	0.221
0.200	55.40	17.67	11.08	14.14	25.22	0.439	25.21	0.04	0.390
0.400	57.10	17.01	22.84	10.21	33.05	0.691	33.08	0.09	0.630
0.600	57.97	16.21	34.78	6.48	41.26	0.843	41.24	0.05	0.793
0.800	58.30	15.37	46.64	3.07	49.71	0.938	49.62	0.18	0.911

La tabla anota la información básica (columnas 1 a 3), los resultados intermedios (columnas 4 a 6) y los resultados finales (columna 7) de los cálculos de la fracción volumen de las mezclas de etanol-agua mostradas. La columna 8 muestra los valores de los volúmenes molares de las mezclas consideradas calculados usando datos de densidad. Su comparación con los resultados de la columna 6 permiten darnos una idea de la precisión con que los volúmenes parciales molares reproducen los volúmenes reales de las mezclas. La diferencia entre los valores de las columnas 6 y 8, expresada en términos de error relativo, se muestra en la columna 9. La última columna contiene los valores de las fracciones masa equivalentes a las fracciones molares y fracciones volúmenes anotados.

Tomando como base un mol de solución se anotan en las columnas 4 y 5 los volúmenes que en la mezcla ocupan x mol de etanol y $1-x$ mol de agua. La suma de estas dos cantidades se anota en la columna 6 como $V_{m,r}$ $cm^3 / g mol$, y corresponde a la estimación que del volumen real de la mezcla se obtiene a través de los volúmenes parciales molares citados. El cociente de $x\bar{V}_1$ y $V_{m,r}$ produce la fracción volumen que se anota en la columna 7 como v . La columna 8 anota como $V'_{m,r}$ los valores de los volúmenes que se obtienen usando los valores experimentales de la densidad de mezclas agua-alcohol obtenidos de la referencia [1.28], y calculados según se muestra en el apéndice 1.1. La comparación entre $V_{m,r}$ y

$V'_{m,r}$ nos da una idea de la precisión con la que los volúmenes parciales molares usados al efecto, reproducen los volúmenes experimentales. El porcentaje de error relativo con que los volúmenes parciales molares reproducen los datos experimentales, calculado como $\%E = 100 \left| (V'_{m,r} - V_{m,r}) / V'_{m,r} \right|$, resulta ser menor al 0.2%. Finalmente se anotan en la columna 8 los valores de las fracciones masa de etanol que corresponden a las fracciones molares y fracciones volumen anotadas. El cálculo se realiza con la ecuación (1.3) usando los siguientes valores para las masas molares de etanol y agua $M_1 = 46.069$, $M_2 = 18.015$ ambas en $g / g mol$. Los resultados anteriores se han representado gráficamente en términos de $x - v_s - v$ en la figura 1.5. Si algún lector desea hacer conversiones de este tipo se le sugiere construir una gráfica de dimensiones mayores a la mostrada o bien ajustar un polinomio a los datos $x - v_s - v$ a fin de llevarla a cabo analíticamente.

En la práctica de la destilación el grado alcohólico del destilado es determinado con el alcoholímetro (también conocido como etilómetro, pesaalcohol, o alcoholómetro) [1.21]. Estos aparatos de vidrio, cuyo funcionamiento está basado en el principio de Arquímedes, determinan el porcentaje en volumen en una mezcla hidroalcohólica [1.22]. Usualmente dotados de un termómetro integrado, al insertar el aparato en una probeta conteniendo la mezcla agua-alcohol bajo estudio, el alcoholímetro se sumerge en mayor o menor grado en la mezcla dependiendo del porcentaje de alcohol de la misma.

Figura 1.5. Alcoholímetro inmerso en la probeta conteniendo la mezcla etanol-agua bajo análisis.



Fuente: Fotografía del autor.

Usualmente calibrados a 20°C, al estabilizarse la flotación se toma tanto la lectura del

termómetro, como la marca en la escala del alcoholímetro correspondiente a la superficie del líquido, manteniendo siempre la posición correcta del ojo lector en relación al menisco. Si la temperatura del líquido durante la medición no fuese igual a 20°C, se aplicarán correcciones obtenidas de tablas suministradas por el fabricante o bien accesibles en la literatura respectiva [1.23]. Las instalaciones modernas, sujetas a las regulaciones y normas inherentes al campo, llevan a cabo una serie de análisis de laboratorio tendientes a garantizar tanto la calidad del producto, la seguridad del consumidor, así como la correspondencia entre el grado alcohólico real y el de etiqueta. Una descripción de estas pruebas puede localizarse, por ejemplo, en la referencia [1.24]. En la figura 1.5 hemos incluido una fotografía de un alcoholímetro inmerso en el líquido sujeto a prueba.

1.6 Los datos de equilibrio etanol-agua a presión atmosférica en términos de la fracción volumen.

En las discusiones que siguen y^* representa la fracción molar de etanol en la fase vapor en equilibrio con una mezcla líquida etanol-agua de fracción molar x . Las fracciones molares de agua, complementarias a las descritas son, respectivamente $(1 - y^*)$ y $(1 - x)$.

Tabla 1.2. Datos de equilibrio a presión atmosférica para el sistema etanol-agua

100 x	100 y^*	T °C	100 v	100 v^*
0	0	100	0	0
1.90	17.00	95.5	4.50	39.00
7.21	38.91	89.0	19.00	68.00
9.66	43.75	86.7	24.00	72.50
12.38	47.04	85.3	29.00	75.00
16.61	50.89	84.1	38.00	78.50
23.37	54.45	82.7	48.50	81.00
26.08	55.80	82.3	52.50	81.50
32.73	58.26	81.5	61.00	83.50
39.65	61.22	80.7	68.50	85.00
50.79	65.64	79.8	78.50	87.50
51.98	65.99	79.7	79.05	88.00
57.32	68.41	79.3	82.50	88.50
67.63	73.85	78.74	88.50	91.50
74.72	78.15	78.41	91.50	93.00
89.43	89.43	78.15	96.00	96.00

Los datos de equilibrio a presión atmosférica para el sistema etanol-agua contenidos en las tres primeras columnas provienen de Perry [1.25]. Las columnas cuatro y cinco contienen la reexpresión en términos de v (fase líquida) y v^* (fase vapor), de la información en términos de porcentaje en mol contenida en las columnas uno y dos, respectivamente.

La información de equilibrio para el sistema etanol-agua a presión atmosférica mostrada en las tres primeras columnas de la tabla 1.2 es la anotada por Perry [1.25]. Los valores de porcentaje en volumen anotados en la cuarta columna ($100v$) corresponden a los porcentajes en mol de etanol en el líquido ($100x$) anotados en la primera columna, mientras que los porcentajes en volumen anotados en la última columna ($100v^*$) corresponden a los porcentajes en mol del vapor ($100y^*$). Las conversiones de fracción molar a fracción

volumen se llevaron a cabo usando una gráfica más amplia y detallada de la que se muestra en la figura 1.6. Las diferentes gráficas de equilibrio a las que la información de la tabla 1.2 da lugar, se muestran en la figuras 1.7 a 1.10.

Existe en la literatura una tabla de conversiones para las propiedades de equilibrio del sistema etanol-agua similar a la mostrada en la tabla 1.2 [1.26]. El problema con esta información es que el autor no ofrece detalles de cómo fue obtenida o calculada, razón por la cual no puede establecerse juicio alguno respecto a su exactitud.

1.7 La curva de equilibrio etanol-agua

Como podrá verse en la segunda parte de este trabajo, la evolución de la destilación intermitente en alambique simple, llamada también destilación diferencial, encuentra su representación teórica en la llamada ecuación de Rayleigh [1.27], mostrada en (1.13) y derivada bajo los supuestos de que todo vapor que abandona el líquido en la olla lo hace en condiciones de equilibrio con este, que la condensación toma lugar única y exclusivamente en el condensador, y que en el caso que nos ocupa, el sistema a destilar puede considerarse fundamentalmente como una mezcla de etanol y agua.

$$\ln \frac{X}{X_i} = \int_{x_i}^x \frac{dx}{y^* - x} \quad (1.13)$$

En la ecuación anterior X_i representa el número inicial de moles de concentración alcohólica molar igual a x_i cargados en la olla; X representa al número de moles remanentes en la olla cuando la concentración alcohólica allí ha caído a x , mientras que $y^* - x$ representa la diferencia entre las composiciones de etanol en el vapor y su líquido en equilibrio, a lo largo de la trayectoria de integración. La ecuación (1.13), usualmente integrada gráficamente permite, vía sencillos cálculos adicionales, establecer una correspondencia entre la cantidad y composición molar del líquido remanente en la olla en un momento dado, con la correspondiente cantidad y concentración molar del destilado contenido en el recipiente colector. Las integraciones gráficas, como sabemos, no solo demandan de la preparación de gráficas $1/(y^* - x) - vs - x$, sino también la evaluación del área bajo la curva ya manualmente, contando unidades de área, o bien con el uso del planímetro. Ahora bien, a efectos de lograr celeridad en los cálculos y obviar tanto la construcción gráfica como la evaluación del área por los métodos descritos, puede optarse por llevar a cabo la integración de la ecuación (1.13) analíticamente mediante el uso de polinomios ajustados a la sección de curva de equilibrio involucrada en la integración. Siguiendo este camino hemos dividido en dos secciones la curva de equilibrio correspondiente al intervalo de concentraciones comunes en la destilación de mostos fermentados, y que va de $0 \leq x \leq 0.1661$

A la primera sección, cubriendo el intervalo $0 \leq x \leq 0.0966$, se le ajustó un polinomio de segundo grado ($y^* = 10x - 59x^2$) que como puede verse de la tabla 3, reproduce los datos experimentales con un error relativo máximo de 6.5 %. A la segunda sección, cubriendo el intervalo $0.0966 \leq x \leq 0.1661$ se le ajustó un polinomio de primer grado ($y^* = x + 0.34$) que

como puede verse también en la tabla 3, reproduce los datos experimentales con un error relativo máximo de 1.6%. El porcentaje de error relativo asociado anotado es el siguiente:

$$%E = 100|(y^* - y^{*, estimada}) / y^*|$$

Tabla 1.3. Reproducción de los datos experimentales de equilibrio con los polinomios

$$y_1^* = 10x - 59x^2, \quad 0 < x < 0.0966$$

x	y^*	$y^*, estimada$	$%E$
0	0	0	0
0.019	0.1700	0.1687	0.76
0.0721	0.3891	0.4143	6.48
0.0966	0.4375	0.4154	5.05

$$y^* = x + 0.34, \quad 0.0966 \leq x \leq 0.1661$$

0.0966	0.4375	0.4366	0.2
0.1238	0.4704	0.4638	1.4
0.1661	0.5089	0.5061	1.55

La reproducción de los datos experimentales de equilibrio con los polinomios mostrados, procede en un caso con un error relativo máximo de 6.5%, y de 1.6% en el otro.

Es necesario aclarar aquí que el error de ajuste arriba descrito no es necesariamente el que introduce el polinomio al cálculo de la integral (1.13). Tratando de tener una idea de la magnitud de este error es que llevamos a cabo la integración de la ecuación (1.13) analíticamente, previa sustitución allí del polinomio $y^* = 10x - 59x^2$, entre los límites de $x_i = 0.0966$ a $x = 0.019$, y comparamos el resultado con el obtenido al graficar $1/(y^* - x) - vs - x$, seguido por la evaluación manual del área. El resultado de la integración analítica fue de 0.2774, mientras que la evaluación gráfica arrojó un resultado de 0.2825 cuando el tamaño de la gráfica, medida en términos del área aproximada bajo la curva era de $\sim 30 \text{ cm}^2$. El porcentaje de error relativo con base al resultado gráfico fue de solo 1.8%. Debe notarse que este calculo se llevo a cabo con el polinomio que presenta mayor error al ajuste. En vista de esta comparación creemos probable que el error introducido por los polinomios al resultado de la integral (1.13) no exceda del 2%.

Figura 1.6. Gráfica para conversión de fracción molar a fracción volumen de etanol en el sistema etanol-agua a 20°C, según datos de la Tabla 1.1.

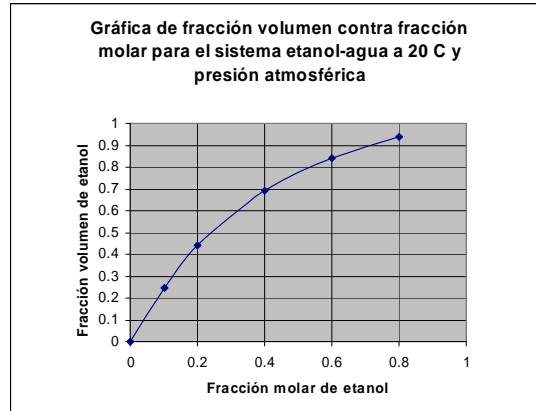
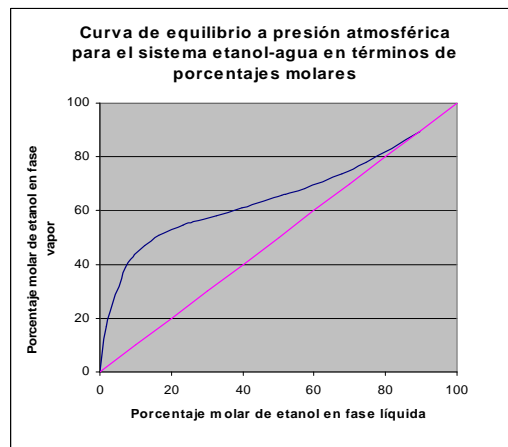
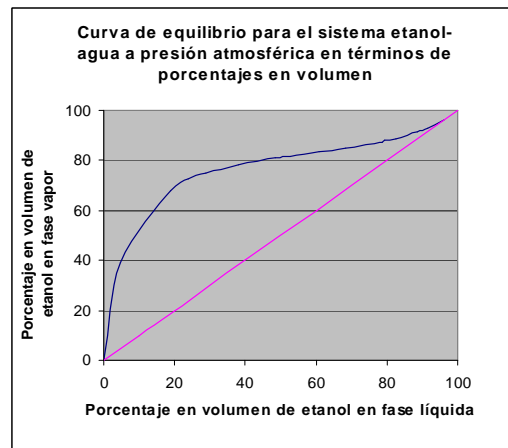


Figura 1.7. Curva de equilibrio etanol-agua a presión atmosférica en términos de porcentajes molares.



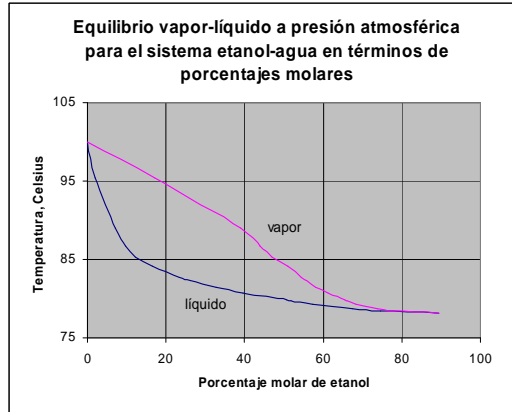
Los valores graficados en los ejes X, Y son, respectivamente, los contenidos en las columnas uno y dos de la tabla 1.2. La línea de pendiente unitaria se ha dibujado como referencia.

Figura 1.8. Curva de equilibrio etanol-agua a presión atmosférica en términos de porcentajes en volumen.



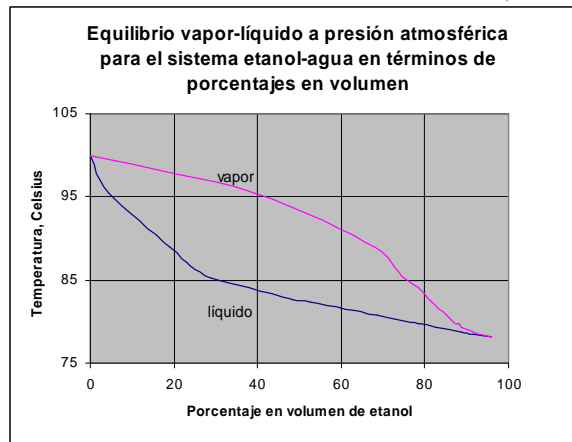
Los valores graficados en los ejes X, Y son, respectivamente, los contenidos en las columnas cuatro y cinco de la tabla 1.2. La línea de pendiente unitaria se ha dibujado como referencia.

Figura 1.9. Los porcentajes molares de etanol en fase líquida y fase vapor corresponden, respectivamente, a los valores de la primera y segunda columna de la tabla 1.2.



Los valores de temperatura son los correspondientes a la tercera columna de la citada tabla. Las curvas mostradas terminan en el azeótropo etanol-agua.

Figura 1.10. Los porcentajes en volumen de etanol en la fase líquida y vapor corresponden, respectivamente, a los contenidos en las columnas cuatro y cinco de la tabla 1.2.



Los valores de temperatura son los contenidos en la tercera columna de la citada tabla. Las curvas mostradas terminan en el azeótropo etanol-agua.

Apéndice 1.1

En la tabla 1.1 se comparó el valor del volumen total de una serie de mezclas etanol-agua ($V_{m,r} \text{ cm}^3 / \text{g mol}$) obtenido mediante el uso de los volúmenes parciales molares citados en la referencia [1.20], con el valor de ese volumen ($V'_{m,r} \text{ cm}^3 / \text{g mol}$) obtenido de determinaciones experimentales de densidad ($\rho, \text{g cm}^{-3}$), tal cual reportadas en la referencia [1.28] y contenidas en las primeras dos columnas de la tabla 4.

Tabla 1.4. Las densidades de una serie de mezclas etanol-agua a 20° C

w	ρ	x	M	$V'_{m,r}$
0.05	0.98938	0.020	18.576	18.775
0.10	0.98187	0.042	19.193	19.547
0.20	0.96864	0.089	20.512	21.176
0.30	0.95382	0.144	22.055	23.123
0.40	0.93518	0.207	23.822	25.473
0.50	0.91384	0.281	25.898	28.340
0.60	0.89113	0.370	28.395	31.864
0.70	0.86766	0.477	31.397	36.186
0.80	0.84344	0.610	35.128	41.648
0.90	0.81797	0.779	39.869	48.741

Las densidades de una serie de mezclas etanol-agua a 20° C y sus fracciones masa correspondientes se anotan en las primeras dos columnas. La columna tres contiene las fracciones molares correspondientes y la columna 4, las masas molares de las mismas. $V'_{m,r}$ para las diferentes mezclas se obtiene finalmente dividiendo las masas molares por las densidades correspondientes.

La rutina de cálculo que lleva a $V'_{m,r}$ empieza convirtiendo las fracciones masa anotadas en la primera columna, a fracciones molares. Esta conversión hace uso de la ecuación (1.1) así como de las masas molares de agua y etanol ($M_1 = 46.069$ y $M_2 = 18.015, \text{g} / \text{g mol}$). Seguidamente se calcula la masa molar ($M \text{ g} / \text{g mol}$) de la mezcla bajo consideración mediante la siguiente ecuación $M = xM_1 + (1-x)M_2$. Finalmente se obtiene $V'_{m,r}$ del cociente M / ρ .

Apéndice 1.2

Con objeto de facilitar y a la vez reducir errores en la conversión fracciones molares-fracciones volumen, hemos ajustado el siguiente polinomio a los datos de $x \leq 0.2$:

$$v = 2.725x - 2.65x^2 \tag{1.14}$$

Dada la forma del polinomio –que asegura su paso por el origen- y del hecho de que son dos los puntos usados (diferentes de (0, 0)- el ajuste, tal como se muestra en la tabla siguiente, es preciso en esos puntos.

x	0	0.1	0.2
v	0	0.246	0.439
v, polinomio	0	0.246	0.439

Apéndice 1.3

Valores seleccionados de la referencia [1.28] para la densidad de mezclas etanol-agua a 20°C ($\rho, g\ cm^{-3}$) en términos de la fracción masa de etanol (w). Si bien la representación gráfica de los datos contenidos en la tabla inferior constituye una avenida a estimaciones rápidas de densidad, para estimaciones de mayor precisión se recomienda usar los datos contenidos en la fuente original que consignan los valores de la densidad correspondiente a cada unidad de fracción masa.

w	$\rho, g\ cm^{-3}$
0	0.99823
0.05	0.98938
0.10	0.98187
0.15	0.97514
0.20	0.96864
0.25	0.96168
0.30	0.95382
0.35	0.94494
0.40	0.93518
0.45	0.92472
0.50	0.91384
0.55	0.90258
0.60	0.89113
0.65	0.87948
0.70	0.86766
0.75	0.85564
0.80	0.84344
0.85	0.83095
0.90	0.81797
0.95	0.80424
1.00	0.78934

BIBLIOGRAFÍA Y NOTAS

- 1.1 **ALAMBIQUES.COM** (2010). *Alambiques: Descripción y Tipos*. Consultado el 11 de enero en: <http://www.alambiques.com/>
- 1.2 **IBERIAN COPPERS S.A.** (2010). *Catalogue*. Consultado el 12 de enero en: <http://www.copper-alembic.com/>. Una muestra de la gran variedad de diseños de alambiques puede verse en este sitio y también en la referencia [1.10].
- 1.3 El instrumento artesanal usado en México por algunos maestros mezcaleros para realizar las funciones de la probeta es el conocido como “Venencia,” que consta de un tramo de carrizo de aproximadamente 15 cm de longitud, mismo que hace las funciones de una pipeta con la cual se succiona una porción de los aproximadamente 200 ml de mezcal colectados en una jarra del efluente del condensador. El grado alcohólico del destilado se juzga por las burbujas o perlas generadas cuando el líquido en el carrizo se deja caer, desde una altura de aprox. 50 cm, sobre el líquido de la jarra. Un artículo que toca este y otros temas relativos a los mezcales mexicanos es el siguiente: Pérez, Cornelio, Mezcales Tradicionales de los Pueblos de México, herencia cultural y biodiversidad, Ciencias 87 (UNAM), Julio-Septiembre 2007, p.57. Una

fotografía de un maestro mezcalero usando la venecia puede verse en la referencia [8], p. 22

- 1.4 **TREYBAL, R. E.** (1955). *Mass Transfer Operations*, Second Edition, Mc Graw-Hill Book Company, International Student Edition, p.307.
- 1.5 **COLLIER, J. R. et al** (2010). *Making Scotch: Engineering, Chemistry, and Education*. Reporte del departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Knoxville, Tennessee. Consultado el 22 de Enero de 2010 en: <http://www.che.utk.edu:16080/islay/congress.pdf>
- 1.6 **BERGLUND, K. A.** (2005). *Artisan Distilling: A Guide for Small Distilleries*, Electronic Edition 1.0.0., pp.62-66. Consultado el 23 de Enero en: <http://www.artisandistilling.org/ARTISANDISTILLING1.0.0.pdf>
- 1.7 **CEDEÑO CRUZ, M., ALVAREZ-JACOBS, J.** (1999). *Production of tequila from agave: historical influences and contemporary processes*, Capitulo 15 del libro: The Alcohol textbook: A reference for the beverage, fuel and industrial alcohol industries, Editado por T. P. Lyons, K. A. Jacques, y D. R. Kelsall, Nottingham University Press, Third Edition. Consultado el 29 de Marzo de 2010, el capítulo de referencia está disponible en: <http://www.scocia.com/newsite/Tequila.pdf.pdf>
- 1.8 **JIMÉNEZ MENDOZA, J. A.** (2009). *Identificación y cuantificación de algunos alcoholes en la destilación y rectificación del mezcal obtenido de agave potatorum zucc*, Tesis, Universidad Tecnológica de la Mixteca,. Disponible en: http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/10969.pdf
- 1.9 **JOHNSON, J.** (1991). *Mysteries of the Malt* *New Scientist Magazine* No. 1753, 26 January.
- 1.10 **OWENS, B.** (2009). *Craft of whiskey distilling*, White Mule Press, Hayward, California, p.11
- 1.11 Una discusión interesante acerca de los aspectos ecológicos ligados a la disposición final de la vinaza se puede encontrar en la referencia [1.7]
- 1.12 **HOW PRODUCTS ARE MADE** (2010). *Cognac*. Consultado el 20 de enero en: <http://www.madehow.com/Volume-6/Cognac.html>
- 1.13. **WIKIPEDIA** (2010). *Single malt Scotch*. Consultado El 20 de enero en: http://en.wikipedia.org/wiki/Single_malt_Scotch
- 1.14. **ALCOHOLES DE TOMELLOSO S.A.** (2010). *Instalaciones*. Consultado el 29 de marzo en: <http://www.altosa.es/index2.htm>
- 1.15. **WOODFORD RESERVE** (2010). *Our distillery*. Consultado el 20 de enero en: <http://www.woodfordreserve.com/>
- 1.16. **BERUMEN BARBOSA, M. E.** (2009). *Oaxaca: La Actividad Productiva Maguey-Mezcal*. (Capítulo: Proceso para la elaboración de mezcal). Edición electrónica gratuita. Consultado el texto completo el 20 de Enero de 2010 en: <http://www.eumed.net/libros/2009a/492>
- 1.17 **BACANORA "DON RAMÓN"**. (2010). *Elaboración*. Consultado el 21 de enero en: <http://queenludovika.com/Elaboracion.html>

- 1.18 **SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE COMERCIO EXTERIOR.** *Resoluciones del Grupo Mercado Común.* Consultado el 27 de enero en: <http://www.sice.org/trade/mrcsrs/resolutions/Res2094.asp>. Siendo el volumen una función de la presión diríamos que con toda propiedad la norma debería consignar también la presión a la que habría de efectuarse la medición de la densidad. El que no se haga es un reconocimiento tácito del hecho de que a presiones moderadas el volumen de fases condensadas es para todo efecto práctico, independiente de la presión.
- 1.19 **BEVAN-OTT, J. & BOERIO-GOATES, J.** (2000). *Chemical Thermodynamics: Principles and Applications*, Academic Press, London, pp 208-225. Aunque casi todo libro de termodinámica o fisicoquímica incluye una discusión relativa a propiedades parciales molares, la que la obra citada arriba ofrece, en opinión del autor, es una de las más detalladas
- 1.20 **ASTON, J. G., FRITZ, J. J.** (1959). *Thermodynamics and Statistical Thermodynamics*, Wiley, New York, p.105
- 1.21 **OSMAN** (2010). *Alcoholímetro.* Unión Europea. Consultado el 2 de febrero en: <http://www.osman.es/ficha/11544>
- 1.22 **ORGANIZACIÓN MUNDIAL DEL COMERCIO** (2010). *Notificación.* Comité de Obstáculos Técnicos al Comercio. Consultado en: http://ec.europa.eu/enterprise/tbt/tbt_repository/EEC280_ES_0000.doc
- 1.23 **COUNTRY BREWER** (2010). *BTE Still Instructions.* Consultado en: <http://www.countrybrewer.com.au/webcontent47.htm>
- 1.24. **SECRETARIA DE ECONOMIA** (2010). *Catálogo de Normas Oficiales Mexicanas.* Consultado en: <http://www.economia-noms.gob.mx/noms/consultasAction.do>
- 1.25 **PERRY, J. H., CHILTON, C. H., KIRKPATRICK, S. D.** (Editors) (1963). *Chemical Engineer's Handbook* Fourth Edition, McGraw-Hill International Student Edition, New York, USA, p.13-5
- 1.26 **ACKLAND, TONY.** (2010). *Physical Properties.* Consultado el 20 de Marzo de 2010 en: <http://homedistiller.org/calc.htm>
- 1.27 **TREYBAL, R. E.,** op. cit., p. 397. La ecuación (1.13) incluye una leve modificación en relación a la notación original.
- 1.28 **PERRY, R. H., CHILTON, C. H.** (Editors), (1973). *Chemical Engineer's Handbook*, Fifth Edition, McGraw-Hill, New York, p. 3-84

IÑIGUEZ, JOSÉ

Ingeniero Químico por la Universidad de Sonora, México (1970) y Maestro en Ciencias en Físicoquímica por el CINVESTAV, México (1972). Ha publicado trabajos sobre la termoquímica de compuestos orgánicos, sobre aspectos básicos de la termodinámica química, y sobre la conexión entre la geometría de la ecuación cuadrática áurea y la secuencia de Fibonacci, entre otros. Su práctica profesional actual combina la consultoría industrial con la docencia y tutoría a nivel universitario. En 2008 salió a la luz su libro: *Negative Entropy: a brief incursion into the uncharted universe of decreasing entropy.*