

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

## **Parte 3: La Segunda destilación**

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

### **RESUMEN**

Los criterios recomendados por una serie de autores para llevar a cabo la separación o corte entre las fracciones llamadas cabeza, corazón y colas en la segunda destilación, son aquí contrastados con los resultados proveídos por la ecuación de Rayleigh. La hipótesis de trabajo que establece que los diferentes criterios son equivalentes ya que en esencia constituyen perspectivas diferentes del mismo momento o momentos en la destilación, encuentra sustento en los resultados de la comparación descrita.

### **DESCRIPTORES**

Destilación, bebidas fermentadas, alcohol etílico, segunda destilación, fracciones de la destilación, ecuación de Rayleigh

### **ABSTRACT**

The criteria recommended by a number of authors in order to carry out heads, hearts, and tails cut in the second distillation, are here compared with the results provided by the Rayleigh equation. The working hypothesis establishing that these apparently different criteria are equivalent because they come from different perspectives of the same phenomenon, which finds support from the results of that comparison.

### **KEYWORDS**

Distillation, fermented beverages, ethyl alcohol, second distillation, fractional distillation, Rayleigh equation

# ALGUNAS CONSIDERACIONES TEÓRICO-PRÁCTICAS SOBRE LA DESTILACIÓN INTERMITENTE EN ALAMBIQUE SIMPLE DE MOSTOS FERMENTADOS Y ORDINARIOS

## PARTE 3: LA SEGUNDA DESTILACIÓN

### 3.1 Introducción

La primera destilación, discutida en la parte 2 de esta serie de 3 trabajos, transformó 100 litros de un mosto fermentado de 10% $v$ , en 41.1 litros de un ordinario de 25% $v$ . Tomaremos aquí este ordinario, lo depositaremos en un alambique simple de dimensiones adecuadas [3.1], y lo someteremos a lo que será la segunda y última destilación del proceso que del mosto fermentado habrá de producir la fracción corazón que, previo aseguramiento de calidad, añejamiento cuando sea necesario, dilución a la concentración alcohólica de mercado, y embotellamiento, llegará a los consumidores.

En esta segunda destilación, tal y como lo hicimos en la primera, usaremos la ecuación de Rayleigh introducida en la ecuación (1.13) y aplicada a la primera destilación en la sección 2.4, a efectos de obtener una descripción de la evolución que experimentan tanto la cantidad como la concentración del ordinario en la olla, así como del destilado producido. Los resultados obtenidos serán comparados con los criterios establecidos por un número de autores relativos a los momentos adecuados para llevar a cabo los cortes.

### 3.2 Los criterios de corte en la segunda destilación

Los criterios de un número de autores en relación al momento adecuado de llevar a cabo la separación o corte del destilado en las fracciones cabeza, corazón y colas, se encuentran consignadas en la tabla 3.1 [3.2-3.8]. Estos se refieren - al igual que los presentados en la parte 2 de esta serie relativos a la primera destilación - a la concentración alcohólica en la probeta, a la concentración del destilado acumulado de la fracción de que se trate, y al porcentaje que el volumen acumulado de la fracción respectiva representa del volumen de ordinario cargado en la olla.

**Tabla No. 3.1.** Valores de algunos parámetros asociados a los cortes cabezas, corazón y colas de la segunda destilación. Los sumarios anotados son simples combinaciones de los diferentes criterios.

#### CABEZAS

Referencia	Porcentaje de alcohol en la probeta, % $v_d$	Porcentaje de alcohol en la fracción, % $v$	Volumen de la fracción como porcentaje de la carga de ordinario % $V$
[3.2]	De % $v_d$ inicial a 72		
[3.3]	De % $v_d$ inicial a 72		
[3.4]	De % $v_d$ inicial a 72		5
[3.5]		75	1-2
SUMARIO	De % $v_d$ inicial a 72	75	1-5

**Tabla No. 3.1.** (Continúa). Valores de algunos parámetros asociados a los cortes cabezas, corazón y colas de la segunda destilación. Los sumarios anotados son simples combinaciones de los diferentes criterios.

### CORAZÓN

Referencia	Alcohol en la probeta $\%v_d$	Porcentaje de alcohol en la fracción, $\%v$	Volumen de la fracción como porcentaje de la carga de ordinario, $\%V$	T, °C
[3.2]	Inicia a 72 concluye a 60			
[3.3]		70	20	
[3.4]	Inicia a 72 concluye a 60		15	
[3.5]		60-65	30	
[3.6]	Inicia a 72 concluye a 59			
[3.7]				$\leq 94.5$
SUMARIO	De 72 a 59	60-70	15-30	$\leq 94.5$

### COLAS

Referencia	Alcohol en la probeta $\%v_d$	Porcentaje de alcohol en la fracción, $\%v$	Volumen de la fracción como porcentaje de la carga de ordinario, $\%V$
[3.3]	Concluye a 1*		
[3.5]	Concluye entre 1* y 3*	20-25	20-25
[3.6]	Inicia a 59		
[3.8]	Inicia a 60		40
SUMARIO	De 59 a 1	20-25	20-40

### VINAZA (RESIDUO EN LA OLLA)

Referencia	Porcentaje de Alcohol en la fracción (olla) $\%v$	Volumen de la fracción como porcentaje de la carga de ordinario, $\%V$
[3.3]	0.1	44
[3.5]	0.1-0.3	40-45
SUMARIO	0.1-0.3	40-45

\*Estos valores no aparecen reportados como tales en las fuentes respectivas, sin embargo están implícitos en los criterios que estas fuentes si especifican y que se refieren a la concentración de la vinaza en la olla. Partiendo de estas últimas y con la ayuda de los datos de equilibrio, es que aquellos fueron determinados.

Deberá allí notarse que el criterio relativo a la concentración en la probeta especifica tanto la concentración a la que inicia, como a la que concluye la fracción considerada. Es interesante notar que tres de los autores consultados dan como punto final de la fracción cabeza una concentración en la probeta igual a 72  $\%v$ . Esto implícitamente determina, de acuerdo a lo mostrado por los datos de equilibrio de la tabla 1.2, o la figura 1.8, que la concentración inicial del ordinario debe ser superior al 23.5  $\%v$  ya que el primer destilado de una mezcla de esta composición tiene precisamente una concentración alcohólica de 72  $\%v$ . Una aplicación ciega de este criterio indicaría que mezclas de esta o inferior concentración empiezan destilando la fracción corazón. Lo que se puede inferir en primera

instancia es que un criterio diferente al mostrado aplica, en general, al caso de ordinarios de esa o menor concentración. Es más, dado el hecho que la concentración volumétrica del primer destilado de un ordinario de 25 %*v* es, como la muestra la tabla 3.2, de 72.43%, parece ser que 25 %*v* es la concentración mas baja a la que este criterio puede aplicar. Aceptemos entonces que para ordinarios de concentración alcohólica igual o mayor a 25 %*v*, la fracción cabeza inicia a la concentración del primer destilado y termina a una concentración en la probeta de 72 %*v*. Los sumarios mostrados en la tabla 3.1 son, cuando aplica, simples fusiones de los intervalos de los diferentes autores. Notaremos también allí que el cuadro correspondiente a la fracción corazón adiciona una columna no incluida en las demás fracciones, y es la referente a la temperatura máxima a la que debe extenderse esta fracción. Este criterio experimental, usado en mecanismos de control automático de este tipo de destilaciones, indica que una temperatura de 94.5°C en la cámara de vapor (ver figura 1.1) señala el punto divisorio entre destilados fragantes y malolientes, y como tal, el punto extremo de colección de la fracción de corazón [3.7]

### 3.3 Las integraciones de la ecuación de Rayleigh

De la hilera correspondiente al punto final de la primera destilación en la tabla 2.3, sabemos que en esta se obtuvieron 41,145 *cm*<sup>3</sup> de ordinario de concentración alcohólica igual al 25 %*v*. En la misma tabla puede verse que esta cantidad de ordinario es equivalente a 1902 *g mol*, y 39714 gramos, mientras que su concentración corresponde a 0.10184 *x*, y 0.2250 *w*. El hecho de que la concentración molar inicial del ordinario antes anotada pertenezca a la sección de la curva de equilibrio descrita por el polinomio  $y^* = x + 0.34$ , con intervalo de validez  $0.0966 \leq x \leq 0.1661$ , nos indica que la ecuación de Rayleigh integrada usando este polinomio es la que nos permitirá seguir la evolución de la cantidad y concentración del ordinario en la olla, y del destilado colectado, para valores de *x* comprendidos en el intervalo  $0.0966 \leq x \leq 0.10184$ . La ecuación de Rayleigh, mostrada en (3.1), integrada mediante la adecuada substitución allí del polinomio descrito, produce la expresión (3.2) en la que se han substituido tanto el número inicial de *g mol* de ordinario,  $X_i = 1902$ , como su concentración  $x_i = 0.10184$ .

$$\ln \frac{X}{X_i} = \int_{x_i}^x \frac{dx}{y^* - x} \quad (3.1)$$

$$X = 1902 \exp[(x - x_i)/0.34] = 1902 \exp[(x - 0.10184)/0.34], \quad \text{para } 0.0966 \leq x < 0.10184 \quad (3.2)$$

Una vez que la concentración del ordinario en la olla adquiere valores tales que  $x < 0.0966$ , se hace necesario combinar el cambio experimentado por el ordinario en el tránsito desde su concentración inicial hasta  $x = 0.0966$ , a ser cuantificado por (3.2), con el cambio asociado al tránsito de esta última concentración, a la que esté siendo considerada. Este último tramo involucra la sección de la curva de equilibrio descrita por el polinomio anotado en (2.2),  $y^* = 10x - 59x^2$  válido para concentraciones en la olla de  $0 \leq x \leq 0.0966$ . La substitución de este polinomio en (3.1) seguida de integración por fracciones parciales, debe recordarse, produce la expresión (2.4) de la sección (2.4). Es esta expresión la que

combinada con (3.2) nos permitirá conocer la cantidad de ordinario en la olla cuando su concentración allí sea  $x < 0.0966$ . La combinación anunciada de (3.2) con la expresión (2.4) es la siguiente

$$\ln \frac{X}{1902} = [0.0966 - 0.10184] / 0.34 + [(1/9) \left( \ln \frac{x}{0.0966} - \ln \frac{9 - 59x}{9 - 59(0.0966)} \right)], \quad x < 0.0966 \quad (3.3)$$

A efectos de hacerla más inteligible, esta combinación se ha escrito en su forma logarítmica. Para toda  $x < 0.0966$ , la carga en la olla ha necesariamente de transitar primero el tramo comprendido entre  $0.0966 \leq x \leq 0.10184$ . Es esta contribución constante la que representa el primer sumando del lado derecho de (3.3). El segundo sumando, debe notarse, es la forma que toma (2.4) una vez que en ella se substituye lo que es la concentración de inicio de este tramo de integración. Como puede verse de la tabla 3.2, los valores de la concentración en la olla seleccionados para seguir la evolución del ordinario en esta parte de la destilación están comprendidos en el intervalo  $0 < x < 0.0966$ . La rutina de cálculo que conduce a la hilera de valores contigua a cada valor de la concentración de alcohol en la olla, anotado como % $x$  en la citada tabla, es idéntica a la discutida en la sección 2.4. La única salvedad, ya anotada en aquella sección, es que la conversión de unidades molares a unidades volumen de concentración demanda, para valores de  $x > 0.2$ , el uso de gráficas del tipo de la figura 1.6, o bien interpolación mediante las cifras contenidas en la tabla 1.1. Las conversiones para  $x < 0.2$  se hará por supuesto, vía la ecuación (1.14), designada en la parte 2 como ecuación (2.5).

### 3.4 Comparación de los criterios de la tabla 3.1, con los datos de la tabla 3.2

Tal y como hicimos en la primera destilación, el modus operandi consistirá en seleccionar la hilera o hileras de los datos proveídos por la ecuación de Rayleigh que coincidan con el o los criterios de los autores consultados referentes a la concentración de alcohol en la probeta (% $v_d$ ). Una vez hecho esto se compararan los criterios remanentes a fin de ver si la información de Rayleigh encaja en los intervalos fijados por los autores. De darse la coincidencia descrita estaríamos probando que los criterios de los autores son equivalentes, es decir, que fijado uno de ellos, los demás quedan determinados.

#### 1. Criterios referentes a la fracción cabeza.

- a) Centremos antes que nada nuestra atención en el hecho de que la tabla 3.1 demanda de esta fracción una concentración alcohólica de 75 % $v$ . El problema que surge con relación a este criterio es que si la fracción cabeza ha de tener una concentración de 75 % $v$  debe ser obvio que dicha fracción debe comenzar a destilar a concentraciones superiores a 75 % $v$ , a efectos de que al mezclarse con los destilados de concentraciones inferiores que le siguen, podamos tener la concentración final mencionada. Ahora bien, el hecho de que el primer destilado de un ordinario de 29 % $v$  tenga precisamente una concentración de 75 % $v$  (tabla 1.2) nos lleva a concluir que si la concentración inicial

requerida para el destilado es superior a ese número, superior al 29% $v$  también debe ser la concentración del ordinario cargado a la olla. Dos problemas surgen en relación a estas consideraciones. El primero consiste en reconocer que dicho criterio no puede aplicarse a ordinarios como el aquí considerado, de concentraciones inferiores a 29% $v$ , razón por la cual no será considerado en las comparaciones por venir. El segundo es de orden más general y se relaciona al hecho de que ordinarios de concentraciones iguales o mayores a 30% $v$  no son recomendados como carga ya que la prueba de turbidez – a describirse más adelante- el complemento ideal a la de alcohol en la probeta para determinar el final de cabezas, falla a estas concentraciones [Russell, p.166], [Hui, p. 175-3]. En otras palabras, una concentración del 75% para la fracción cabeza en su conjunto pone la concentración de la carga de ordinario en el rango de concentraciones incompatibles con la prueba de la turbidez, esencial a un buen corte entre cabezas y corazón.

- b) De acuerdo al criterio de la tabla 3.1 la fracción cabeza deja de colectarse al marcar la probeta una concentración de 72% $v_d$ . A fin de localizar este punto trataremos de *estimar* la concentración en la probeta ( $x_d$ ) en la vecindad de 9.66% $x$ . Al efecto veamos con detalle lo que acontece en el tránsito de 9.8 a 9.66% $x$ . Vemos de la tabla 3.2 dicho cambio viene acompañado por la producción de  $29.1 - 21.36 = 7.74$   $g\ mol$  de destilado, mismas que acarrearán  $12.78 - 9.397 = 3.383$   $g\ mol$  de alcohol. Esto significa que el destilado que en ese tránsito sale a la probeta lo hace con una concentración molar de alcohol igual a  $x_d = (3.383 / 7.74) = 0.43708$ , equivalente (tabla 1.1) a 71.92% $v_d$ , número suficientemente cerca de 72% $v_d$  como para decir que la fracción cabeza concluye a 9.66% $x$ .
- c) El volumen colectado de esta fracción, tal y como puede verse en la tabla 3.2, es de  $1009\ cm^3$  de concentración igual a 72.08% $v_D$ , y corresponde al  $[100(1009/411450)] = 2.45\ %V$  de la carga de ordinario. Este número se localiza en la región central del intervalo comprendido entre el 1% y el 5%, tal cual expresado en el sumario respectivo de la tabla 1.1

## 2. Criterios referentes a la fracción corazón

- a) El haber concluido la fracción cabeza a  $\sim 72\ %v_d$  implica que esa es la concentración de inicio de la fracción corazón y por lo tanto igual a la mostrada en el sumario respectivo de la tabla 3.1. A efectos de determinar el punto final de la destilación de Rayleigh coincidente con aquel fijado por los autores de 59% $v_d$ , haremos la siguiente estimación de  $x_d$  para el tránsito de la mezcla en la olla de 4.50 a 4.25% $x$ . Notemos que en ese intervalo se han generado  $316.2 - 302 = 14.2$   $g\ mol$  de destilado ( $D$ ) que acarrearán consigo  $126.30 - 121.70 = 4.6$   $g\ mol$  de alcohol( $d$ ), lo que nos dice que la fracción molar de esta porción de destilado es de  $x_d = (4.6/14.2) = 0.324$ , equivalente, según la tabla 1.1 a  $v_d = 0.595$ , o 59.5% $v_d$ , valor que tomaremos como coincidente por

el fijado por los autores y que determina a la hilera correspondiente a  $4.25\%x$  en la tabla 3.2 como aquella a la que concluye la colección de la fracción corazón.

- b) Los cálculos a realizarse en este inciso son consecuencia de la remoción o corte de la fracción cabeza. De la tabla 3.2 podemos ver que el número de  $g\ mol$  de destilado colectado en esta fracción corresponde a  $316.2 - 29.1 = 287.1$ . Notar que a los  $g\ mol$  acumulados ( $D$ ) a  $4.25\%x$  hemos restado aquellos que fueron removidos con la fracción cabeza. Un procedimiento similar nos indica que los  $g\ mol$  de alcohol ( $d$ ) en la fracción corazón son igual a  $126.30 - 12.78 = 113.52$ . Estos datos nos permiten decir que la concentración alcohólica de esta fracción es de  $\% x_D = 100 (113.52 / 287.1) = 39.54$ , equivalente (tabla 1.1) a  $68.5\%v_D$ , número localizado dentro del intervalo de concentraciones de  $60 - 70\%v_D$  establecido en el sumario de la tabla 3.1.
- c) La información proveída por la columna  $W_D$  tabla 3.2 nos permite ahora determinar que la masa de fracción corazón colectada es de  $9236 - 883 = 8353\ g$ , de los cuales (combinado la información de las columnas  $W_D$  y  $w_D$ ) los siguientes corresponden al alcohol:  $[(9236)(0.629)-(883)(0.667)] = 5220\ g$ . La fracción masa correspondiente es de:  $\%w = 5220 / 8353 = 62.5\%$ . El valor así determinado para el porcentaje másico de alcohol en la fracción corazón nos permite, en turno, conocer –vía la referencia [1.28]- que su densidad es de  $0.88533\ g\ cm^{-3}$ . Finalmente el cociente  $(8353 / 0.88533)$  nos permite conocer que el volumen de corazón colectado es de  $9435\ cm^3$ , y representa el  $100(9435 / 41145) = 22.9\%V$  de la carga de ordinario Este número forma también parte del intervalo de  $15-30\%$  anotado en la tabla 3.1
- d) En la tabla 3.2 aparece anotada la temperatura de  $92.6^\circ C$  en la hilera de datos correspondiente a la conclusión de la fracción corazón. Esta temperatura, calculada de la tabla 1.2, corresponde a la temperatura de ebullición de la mezcla en la olla cuando la concentración allí es de  $4.25\%x$  y puede tomarse como una aproximación a la temperatura que a ese momento existe en la cámara de vapor. Como puede verse, esta temperatura es menor a la establecida como límite a la colección de la fracción corazón, de  $94.5^\circ C$  [3.7]
- e) Hemos ya mencionado la prueba conocida como de turbidez, diciendo solo que constituye un complemento tanto a la experiencia del maestro destilador como a la probeta en lo que concierne a la determinación del punto inicial de la fracción corazón. Esta prueba, descrita con suficiente detalle tanto por Russell [3.2], como por Hui [3.9] consiste básicamente en tomar, a intervalos cortos de tiempo, pequeñas muestras del destilado que se dirige a la probeta. A las muestras paulatinamente se le va agregando porciones de agua, seguidas de agitación. Si la turbidez que se genera al agregar la primera porción de agua - similar a la que se produce cuando se mezcla licor de anís con agua –desaparece cuando el porcentaje de alcohol en volumen *de la muestra* ha caído a  $\sim 45.7$ , se puede empezar a coleccionar la fracción corazón.

### 3. Criterios referentes a la fracción colas

- a) Habiendo concluido la fracción corazón y por tanto iniciado la colección de la fracción colas a  $59\%v_d$ , localizaremos a continuación la concentración en la olla al momento de terminar de coleccionar esta fracción. Para tal efecto notemos que el número de  $g\ mol$  de destilado producido en la transición de  $0.15$  a  $0.10\%x$  es de  $893.0 - 846.1 = 46.9\ g\ mol$ , mismos que llevan consigo  $192.69 - 192.12 = 0.57\ g\ mol$  de alcohol. Estos datos nos permiten decir que la fracción molar del destilado producido en este tránsito es de  $x_d = (0.57 / 46.9) = 0.0121$ , equivalente a  $3.3\%v_d$ , cifra suficientemente cercana al límite inferior del criterio autoral. Este cálculo nos permite fijar la hilera correspondiente a  $0.10\%x$  en la tabla 3.2 como aquella a la que concluye la colección de la fracción colas y por tanto, aquella a la que se concluye la segunda destilación.

Habiendo logrado una coincidencia razonable entre los datos de la ecuación de Rayleigh y los de la tabla 1.1 en lo que a  $\%v_d$  se refiere para la fracción colas, pasaremos a comparar la coincidencia o falta de ella de los demás criterios. Los cálculos a realizar en los tres incisos siguientes son consecuencia de la remoción de las fracciones corazón y cabeza.

- b) Calcularemos ahora la concentración alcohólica de esta fracción. Siguiendo el procedimiento arriba usado tenemos que el número de  $g\ mol$  de colas destiladas ( $D$ ) es de  $893.0 - 316.2 = 576.8$ , mismas que consigo llevan un número de  $g\ mol$  de alcohol ( $d$ ) igual a  $192.69 - 126.30 = 66.39$ . De acuerdo a esto, la fracción molar de alcohol es igual a  $x_D = (66.39 / 576.8) = 0.115$ , equivalente (tabla 1.1) a  $27.5\%v_D$ , cifra que cae por fuera del intervalo de  $20 - 25\%v_D$  mostrado en la tabla 1.1.
- c) De la tabla 3.2 podemos ver que la masa de esta fracción es de  $21494 - 9236 = 12258\ g.$ , de los cuales (columnas  $W_D$  y  $w_D$ ) son de alcohol los siguientes:  $[(21494)(0.413) - (9236)(0.629)] = 3068\ g$ , lo que nos lleva a una fracción masa de  $3068 / 12258 = 25.0\%w$ . Este dato nos permite ahora determinar que su densidad [1.27] es de  $0.96168\ g\ cm^{-3}$ . Consecuentemente, el volumen de colas es de  $12258 / 0.96168 = 12746\ cm^3$ , cifra que corresponde al  $12746 / 41145 = 30.98\%V$  de la carga de ordinario.

**Tabla No. 3.2.** Evolución de concentraciones y cantidades tanto para el mosto en su segunda destilación ( $x, w, v, X, W, V$ ), como para el destilado colectado ( $x_D, w_D, v_D, D, d, W_D, V_D$ ). La tabla incluye los valores de las masas molares ( $M, M_D$ ), y densidades ( $\rho, \rho_D$ ) usadas en los cálculos.

%x	%w	%v	X	M	W	$\rho$	V	D	d	$x_D$	$w_D$	%v <sub>D</sub>	$M_D$	$W_D$	$\rho_D$	$V_D$	T °C
10.184	22.50	25.00	1902		39714		41145			0.4438*		72.43				0	
9.90	21.94	24.35	1886	20.79	39218	0.96600	40598	15.82	6.97	0.4406	0.668	72.19	30.38	481	0.87524	549	
9.80	21.75	24.11	1881	20.76	39050	0.96626	40413	21.36	9.397	0.4399	0.667	72.13	30.36	648	0.87548	740	
9.66	21.48	23.85	1872.9	20.72	38806	0.96663	40146	29.1	12.78	0.4392	0.667	72.08	30.34	883	0.87548	1009	
8.00	18.19	19.68	1781.9	20.26	36101	0.97104	37178	120.1	51.15	0.4259	0.655	71.69	29.96	3598	0.87830	4097	
7.00	16.14	17.78	1730.6	19.98	34577	0.97369	3511	171.4	72.56	0.423	0.652	70.85	29.88	5121	0.87901	5826	
6.00	14.03	15.40	1679.8	19.70	33092	0.97643	33891	222.2	92.91	0.418	0.647	70.47	29.74	6608	0.88018	7508	
5.00	11.86	12.96	1627.4	19.42	31604	0.97929	32272	274.6	112.33	0.409	0.639	69.78	29.49	8098	0.88206	9181	
4.50	10.75	11.73	1600.0	19.28	30848	0.98105	31444	302.0	121.70	0.403	0.633	69.33	29.32	8855	0.88347	10023	
4.25	10.19	11.10	1585.8	19.21	30463	0.98160	31034	316.2	126.30	0.399	0.629	68.97	29.21	9236	0.88440	10443	92.6
4.00	9.63	10.48	1571.2	19.14	30073	0.98240	30612	330.8	130.85	0.396	0.626	68.60	29.12	9633	0.88510	10883	
3.00	7.33	7.94	1507.5	18.86	28431	0.98577	28841	394.5	148.47	0.376	0.606	66.08	28.56	11267	0.88974	12663	
2.50	6.15	6.64	1470.7	18.72	27531	0.98757	27877	431.3	156.93	0.364	0.594	64.56	28.23	12176	0.89252	13642	
2.00	4.96	5.34	1428.6	18.58	26543	0.98938	26828	473.4	165.13	0.349	0.578	62.67	27.80	13160	0.89620	14684	
1.00	2.52	2.70	1312.0	18.30	24010	0.99360	24165	590.0	180.58	0.306	0.530	57.26	26.60	15694	0.90711	17301	

**Tabla No. 3.2.** (Continúa). Evolución de concentraciones y cantidades tanto para el mosto en su segunda destilación ( $x, w, v, X, W, V$ ), como para el destilado colectado ( $x_D, w_D, v_D, D, d, W_D, V_D$ ). La tabla incluye los valores de las masas molares ( $M, M_D$ ), y densidades ( $\rho, \rho_D$ ) usadas en los cálculos.

0.60	1.52	1.62	1235.8	18.18	22467	0.99541	22571	666.2	18628	0.280	0.499	53.98	25.87	17235	0.91406	18855	
0.40	1.02	1.09	1179.6	18.13	21386	0.99636	21464	722.4	18898	0.262	0.476	51.71	25.36	18320	0.91910	19932	
0.20	0.51	0.54	1090.5	18.07	19705	0.99729	19758	811.5	19152	0.236	0.441	48.44	24.64	19995	0.92664	21578	
0.15	0.38	0.41	1055.8	18.06	19068	0.99752	19115	846.1	19212	0.227	0.429	47.3	24.38	20628	0.92918	22200	
0.10	0.25	0.27	1009.0	18.04	18202	0.99776	18243	893.0	19269	0.216	0.413	45.92	24.07	21494	0.93252	23049	
0.08	0.20	0.22	984.1	18.04	17753	0.99786	17791	917.9	19291	0.210	0.405	45.16	23.91	21947	0.93416	23494	
0.06	0.15	0.16	953.0	18.03	17183	0.99795	17218	949.0	19313	0.203	0.394	44.28	23.71	22501	0.93639	24029	

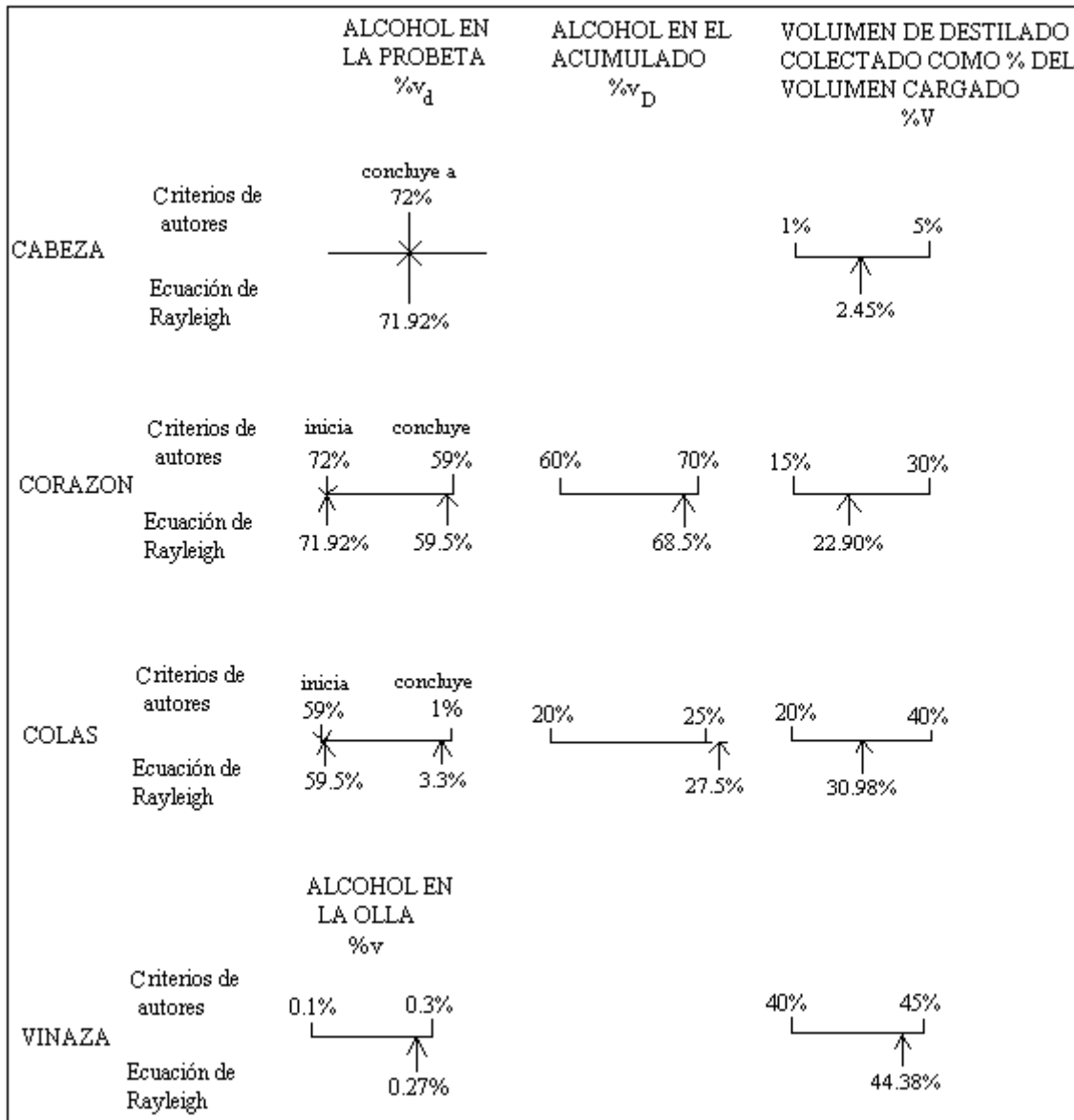
\*Este valor fue obtenido por interpolación de los datos de equilibrio de la tabla 1.2.

#### 4. Criterios referentes al residuo en la olla (vinaza)

- a) De la tabla 3.2 podemos ver que el haber concluido la segunda destilación cuando la concentración en la olla era de  $0.10\%x$ , implica que el número de  $g\ mol$  allí contenidas es de 1009. Esta cifra permite, como se muestra enseguida, una comprobación de los cálculos realizados. La cantidad de vinaza en la olla al momento del paro de la segunda destilación debe corresponder también a la diferencia entre el número de  $g\ mol$  iniciales, 1902, y el acumulado de  $g\ mol$  retirados al momento del paro, leídos estos en el cruce de la columna  $D$  y la hilera correspondiente a  $0.10\%x$ , y de magnitud 893.0 (igual también a la suma de los moles de cabeza, corazón, y colas). La operación descrita da un resultado de  $1009\ g\ mol$ , igual a la cifra arriba anotada. La concentración molar de la vinaza puede ser comprobada calculando el número de  $g\ mol$  de alcohol allí contenidas como la diferencia entre el número de moles iniciales y las que hasta ese momento se han destilado (columna  $d$ , misma hilera), operación que produce  $(1902)(0.10184)-(192.69) = 1.01\ g\ mol$ . El porcentaje molar de alcohol en este residuo es de  $1.01 / 1009 = 0.10\%x$ , idéntico a la cifra antes anotada. En la tabla 3.2 podemos ver que esta concentración molar de la vinaza al momento del paro corresponde a una concentración en volumen de  $0.27\%v$ , cifra que cae dentro del intervalo asociado al criterio autoral representado en la tabla 3.1.
- b) Los datos de la tabla 3.2 nos permiten también conocer que la masa de este remanente en olla es de  $39714 - 21494 = 18220\ g$ . Dado que el porcentaje másico que marca la tabla 3.2 es de  $0.25\%w$ , podemos entonces decir que el número de gramos de alcohol en la vinaza es de  $(18220)(0.0025) = 45.55\ g$ . Esta cifra debe corresponder a la que produce la diferencia entre la masa inicial de alcohol y la que hasta ese momento se ha ido en cabeza, corazón, y colas, cuantificada por el producto de los valores

correspondientes a las columnas  $w_D$  y  $w_D$  de la hilera antes referida. Esta operación produce el siguiente resultado:  $(39714)(0.2250)-(21494)(0.413) = 58.63$  g. La diferencia asciende a 13.1 g.

**Figura No. 3.1** Los criterios de inicio y corte de las fracciones, establecidos en base a concentraciones puntuales del alcohol en la probeta, han sido representados con flechas.



Los criterios que han sido establecidos en base a intervalos de valores, tales como los relativos a la concentración alcohólica de la fracción ( $%v_D$ ), o al volumen de fracción colectado ( $%V$ ), fueron representados como tales. Podemos apreciar en la figura que una vez que a la información de Rayleigh se imponen los criterios de inicio y corte establecidos por los autores, las características medidas por  $%v_D$  y  $%V$  de todas las fracciones (salvo una excepción) caen en los intervalos establecidos por aquellos. Con la excepción del valor obtenido para la concentración alcohólica de la fracción colas, podemos entonces concluir

que entre los diferentes criterios arriba mostrados, establecidos por autores y especialistas en el campo de la destilación, existe correspondencia y en razón de ello, forman un conjunto consistente.

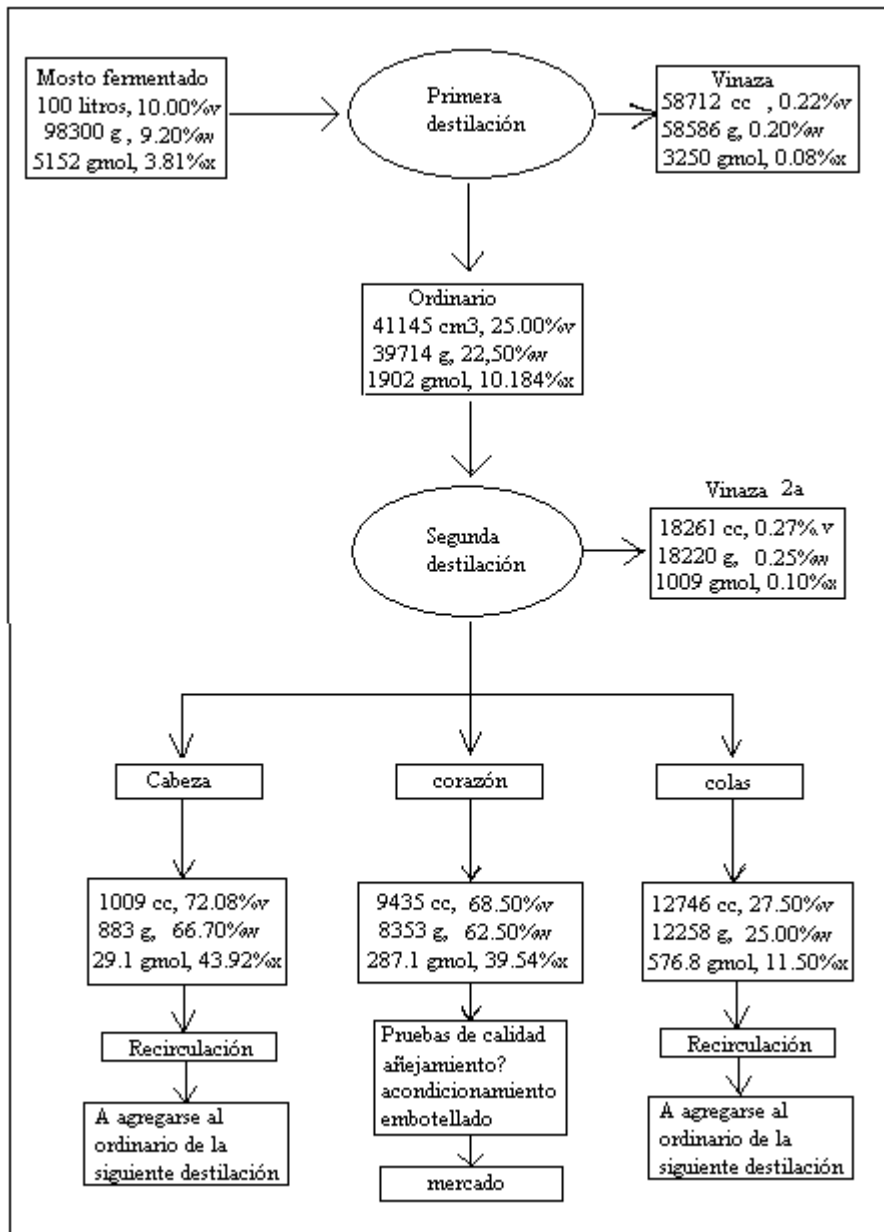
Este resultado de ninguna manera significa que exista un error de esa magnitud en cuanto al alcohol en la vinaza. El cálculo que produce 58.63 g como resultado, debe notarse, asume que las cantidades de alcohol en cabeza, corazón y colas, es preciso, sin error, cosa no del todo cierta. El que esto es así es ilustrado por el hecho de que calculada por separado, la cantidad de alcohol en cabeza, corazón y colas asciende a  $(883)(0.667)+(8353)(0.625)+(12746)(0.250) = 8874.09$  gramos y no a los  $(21494)(0.413) = 8877.02$  gramos que se obtienen usando la masa acumulada y la fracción masa correspondiente. Quizás una mejor ilustración al respecto lo constituye el hecho de que un error de 33 gramos en el acumulado de masa de cabeza, corazón y colas (es decir de 21494 a 21524 g) produce, a un nivel de  $w_D = 0.413$ , un error de  $(33)(0.413) = 13.6$  g de alcohol, prácticamente idéntico al antes anotado. Tomando como cierto el valor anotado en la tabla 3.2, tenemos entonces que a un porcentaje másico de 0.25 %*w* corresponde una densidad de  $0.99776 \text{ g cm}^{-3}$  [1.28], lo que implica que el volumen de la vinaza asciende a  $18220 / 0.99776 = 18261 \text{ cm}^3$ , cifra equivalente al 44.38% del volumen original.

Una vez concluidos estos cálculos podemos hacer notar que la suma de volúmenes de cabezas, corazón, colas, y vinaza, asciende a:  $1009+9435+12746+18261 = 41451 \text{ cm}^3$  y no a los  $41145 \text{ cm}^3$  iniciales. Dada la no-idealidad del sistema etanol-agua, los reajustes o reajustes en concentración antes calculados, ocasionados precisamente por la realización de los cortes, produce que los volúmenes de estas fracciones no correspondan, como si lo hacen las cantidades másicas y molares, a la simple diferencia de los volúmenes anotados en la tabla 3.2. Esto ocasiona que los porcentajes en volumen calculados previamente arriba no sumen 100%, sino  $2.45 + 22.90 + 30.98 + 44.38 = 100.71\%$ . La información numérica relevante de esta sección aparece en la tabla 3.3 y en forma de [balance de materia / diagrama de flujo] en la figura 3.2

**Tabla No. 3.3.** Cuantificación de las diferentes fracciones asociadas a la segunda destilación

	Cabeza	Corazón	Colas	Vinaza	Sumas	Inicial	Diferencia
<i>g mol</i>	29.1	287.1	576.8	1009	1902	1902	0
Gramos	883	8353	12258	18220	39714	39714	0
<i>g mol</i> de alcohol	12.78	113.52	66.39	1.01	193.7	193.7	0
% <i>x</i>	0.4392	39.54	0.115	0.100	-----	-----	-----
Gramos de alcohol	588.96	5220.62	3064.50	45.55	8919.63	8935.65	Ver apartado 4(a) de la sección 3.4
% <i>w</i>	66.70	62.50	25.00	0.25	-----	-----	-----
Densidad	0.87548	0.88534	0.96168	0.99776	-----	-----	-----
Volumen, cc	1009	9435	12746	18261	41451	41145	306 (0.74%)
% <i>v<sub>D</sub></i>	72.08	68.5	27.5	(0.27 % <i>v</i> )	-----	-----	-----
% <i>V</i>	2.45	22.9	31.0	44.38	100.74	100.0	0.74%

**Figura No. 3.2.** Balance de materia para la segunda destilación.



Fuente propia

### 3.5 Confianza de las estimaciones

Reconozcamos ahora que al ser la ecuación de Rayleigh un modelo de la destilación diferencial, cualquier estimación de la exactitud con que este modelo es capaz de retratar la realidad debe provenir precisamente de una comparación con resultados experimentales. No tenemos de hecho ninguna información al respecto de alguna comparación basada en el sistema etanol agua. Tal y como ha sido ya mencionado, la única información relacionada proviene de un estudio del sistema acetona-agua, y muestra que los datos de Rayleigh

difieren de los experimentales en ~ 4.5%. Con base en esta información podríamos decir aquí que esperaríamos que nuestros datos mostraran diferencias del mismo orden de magnitud que el arriba anotado.

### 3.6 Comentarios finales

1. De las comparaciones realizadas en este y el trabajo previo puede concluirse que el caos representado por lo que a primera vista parece ser un número de criterios inconexos, avanzados a fin de conducir a buen puerto las dos destilaciones aquí estudiadas, es solo aparente. Lo que hemos aquí probado es que los criterios representados en los sumarios de las tablas 2.1 y 3.1 –algunos de ellos combinaciones de los criterios de dos o más autores- son equivalentes, o alternativamente, son correspondientes. La equivalencia o correspondencia adscrita a estos criterios radica en el hecho de que una vez que en la información proveída por la ecuación de Rayleigh se insertan los criterios autorales relativos al alcohol en la probeta, se produce como consecuencia una clara correspondencia entre las características del destilado de Rayleigh con los criterios citados relativos al alcohol en la fracción, o al volumen de fracción colectado. Esto se traduce en el hecho de que una vez que se fija la condición relativa al alcohol en la probeta para el fin de la primera destilación, o bien para alguno de los cortes –cabeza, corazón o colas- en la segunda destilación, tanto la concentración de la fracción que esté siendo considerada, como el volumen colectado - medido como porcentaje del volumen inicialmente cargado a la olla - quedan determinadas por los intervalos de valores especificados por los criterios referidos.
2. Los criterios de corte de las fracciones de esta segunda destilación, establecidos en base a valores puntuales, precisos, del alcohol en la probeta, dejan claro que esta es la variable central o cardinal del proceso de destilación. Si estos criterios son seguidos adecuadamente, la satisfacción de los demás criterios vendrá como natural consecuencia.  
Los criterios proveídos en las tablas 2.1 y 3.1 intentan cubrir – y lo hacen con relativo éxito - la gran mayoría de mostos fermentados en primera, y de ordinarios en segunda destilación. A menos que se disponga de más información creemos que los criterios relativos tanto a la primera destilación como a la segunda destilación, mostrados en las tablas 2.1 y 3.1-con excepción de aquel discutido en el apartado 1(a) de la sección 3.2, deben conservarse.
3. Un aspecto que ha merecido solo comentarios breves es la relativa a la velocidad a la que deben conducirse la primera y segunda destilaciones. Su importancia podrá quizás apreciarse reconociendo que la mayor diferencia posible de concentraciones entre la fase líquida y vapor en la olla, se presenta bajo condiciones de equilibrio entre estas fases. Una destilación a velocidad moderada favorece o apunta hacia esa dirección. Contrariamente, velocidades excesivas de destilación no proveen el tiempo de contacto suficiente a fin de tener buenas aproximaciones a esa condición, lo que podría conducir a concentraciones inferiores en el destilado. El tránsito de estas consideraciones cualitativas, a especificaciones precisas de la velocidad de destilación son, sin embargo, asuntos que deben determinarse *in situ*.

El disponer de una cifra relativa a la velocidad de destilación sea en  $g/min$  o  $cm^3/min$  puede llevar, a través de su combinación con la información proveída por las tablas 2.3 o 3.2, a una estimación tanto del tiempo al que habrá de concluirse la primera destilación, como de aquel al que se esperan los cortes en la segunda. Por ejemplo, si la velocidad promedio en la primera destilación es de, digamos,  $200 cm^3/min$ , entonces esta estaría concluyendo aproximadamente en  $41145 / 200 = 206$  minutos ( $\sim 3.5$  horas). Este tiempo no incluye, como debe ser obvio, el empleado en llevar la mezcla de su temperatura inicial a la de ebullición.

Consideraciones similares aplican a la segunda destilación aunque habría aquí que mencionar que algunos maestros destiladores conducen las primeras etapas de esta destilación a velocidades menores que aquella a la que conducen las etapas finales.

4. Diremos también que todo estudio de ingeniería química de algún proceso particular debería incluir un balance de energía. Dado que un balance de este tipo depende de situaciones particulares que cambian de instalación a instalación, digamos tipo de combustible, tipo de horno, aislamiento, condiciones ambientales, material de construcción del alambique, etc. etc. es que se consideró impropio incursionar aquí en esa área.
5. Mencionamos en el texto, al igual que en la figura 3.2, que es práctica común el mezclar las cabezas y colas con el ordinario de la siguiente destilación a fin de incrementar la recuperación del alcohol contenido en aquellas. El cálculo asume que el ordinario de la siguiente destilación es de iguales características al aquí obtenido. De las tablas 2.4 y 3.3 sabemos que las masas totales y de alcohol en cabezas, colas, y ordinario son las siguientes: 883 g, 12.78 g; 12258 g, 3064.5 g; y 39714 g, 8935.65 g. Las respectivas sumas de estas cantidades arrojan una masa combinada de 52855 g, de los cuales 12013 corresponden a alcohol, lo que en turno significa que el porcentaje en masa de alcohol en esta mezcla es de 22.73 %*w*. La conversión de esta cifra a unidades molares y de volumen produce los siguientes valores: 0.10317 %*x* y 25.29 %*v*. Como puede verse de esta última cifra, la concentración de la mezcla es para todo efecto práctico idéntica a la del ordinario. De acuerdo a la fracción masa antes calculada, la densidad de esta mezcla es de 0.96490 [1.27], de forma que su volumen asciende a  $54778 cm^3$ .
6. El material de construcción por excelencia de los alambiques es el cobre. El por que esto es así encuentra respuesta en las siguientes consideraciones
  - “El cobre actúa como catalizador en la producción de esteres (compuestos aromáticos, nota del autor), y precipita lípidos, mejorando así la claridad del destilado. El acero inoxidable no ofrece estas propiedades” [3.4]
  - “El cobre tiene una importante influencia en la calidad del destilado ya que remueve aromas sulfurosos o vegetales por medio de reacción química” [3.9]
  - “El cobre es un material importante en el alambique ya que los nocivos sulfuros presentes en el vapor reaccionan de manera instantánea con el cobre...” [3.6, p. 35]
  - “Los alambiques son comúnmente hechos de cobre, material que fija...los malolientes compuestos de azufre producidos durante la fermentación” [3.11]

- Los alambiques de cobre se usan para la destilación de Brandy, coñac, cerveza, whisky fino...por una muy buena razón. Los iones cobre en el alambique se combinan con los compuestos sulfurosos manteniéndolo fuera del destilado...” [3.12]

El ingeniero químico o estudiante de esta disciplina reconocerá que las consideraciones anteriores convierten la destilación en alambique de cobre en una *destilación reactiva*.

## REFERENCIAS Y NOTAS DE LA PARTE 2

- 3.1 La práctica de la destilación intermitente en alambique simple recomienda que el volumen de carga a la olla sea el equivalente de 1/2 a 2/3 aproximadamente del volumen de la olla. Siendo esto la primera destilación requiere de una olla con volumen entre 150 y 200 litros. Siguiendo esta regla, la segunda destilación requiere de una olla con volumen entre 60 y 80 litros. Es práctica común en destilerías de este tipo el contar con alambiques diferentes para la primera y la segunda destilación. Existen otras, sin embargo, que organizan su producción en base a alambiques de una sola capacidad, usados indistintamente en ambas destilaciones.
- 3.2 **RUSSELL INGE** (2003). Volume Editor *Handbook of Alcoholic Beverages Series, Whisky: Technology, Production, and Marketing*, Academic Press, p. 165-167
- 3.3 **COLLIER, J. R. et al.** (2005). *Making Scotch: Engineering, Chemistry, and Education*, Reporte del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Tennessee en Knoxville, pp. 5-7. Consultado en: <http://www.che.utk.edu:16080/islay/congress.pdf>
- 3.4 **GLENFARCLAS**. *Distillation (First and Second)*. Consultado el 17 de Marzo 19 de 2010 en: [http://www.glenfarclas.co.uk/en/pages/64,Distillation\\_%28First\\_and\\_Second%29.html](http://www.glenfarclas.co.uk/en/pages/64,Distillation_%28First_and_Second%29.html)
- 3.5 **BERGLUND, K. A.** (2004). *Artisan Distilling: A guide for small distilleries*, Electronic Edition 1.0.0, p. 46-47. Consultado el 19 de Febrero 19 de 2010 en: <http://www.artisandistilling.org/ARTISANDISTILLING1.0.0.pdf>
- 3.6 **OWENS, B., DITKY, A.** (2009). *The Art of Distilling Whiskey and Other Spirits*, Quarry Books, Beverly, Massachusetts, USA, p.38
- 3.7 **LU, S. M., HUANG, R. H.** (1988). *Microcomputer control of distillate streams from pot distillation of wines*, Chemical Engineering Communications, 74, 1, pp.73-84
- 3.8 **HM REVENUE & COSTUMS**. *Technical guidance. Stages of production: Pot Still Distillation*. Consultado el 17 de Marzo de 2010 en: <http://www.hmrc.gov.uk/manuals/spirmanual/SPIR4100.htm>
- 3.9 **HUI 3.7 YUI H. HUI, Editor** (2003). *Handbook of Food science, technology and engineering*, Vol. 4, CRC Press (Taylor and Francis Group), Boca Raton, Florida, USA, p. 175-3

3.10 **HARRY MCCORMACK, Editor** (1940). The Applications of Chemical Engineering, D. Van Nostrand Company, Inc., New York, USA, p. 205. Se sugiere leer los comentarios que relativos a esta cuestión fueron anotados en la sección 2.3

3.11 **M. CEDEÑO CRUZ AND J. ALVAREZ-JACOBS** (1999). Production of tequila from agave: historical influences and contemporary processes, Chapter 15 in *The Alcohol Textbook: A reference for the beverage, fuel, and industrial alcohol industries*, Lyons, T. P., Jacques, K. A. and Kelsall, D. R. Editors, Nottingham University Press, p. 236

3.12 **ROSE, JEANNE**. Copper in History & Distillation. Consultado el 15 de Marzo de 2010 en:

[http://www.aromaticplantproject.com/articles\\_archive/copper.html](http://www.aromaticplantproject.com/articles_archive/copper.html)

#### ÍNIGUEZ, 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*.