

SIMULACIÓN DE LA OPERACIÓN DE OBTENCIÓN DEL PISCO EN UNA COLUMNA DE DESTILACIÓN DISCONTINUA EMPACADA DE ACERO INOXIDABLE

**M. Otiniano C.¹, P. Romero², E. Vicuña², R. Robles², A. Garrido¹,
T. Linares³, N. Salas⁴, J. Lombira¹, H. Helfer², J. Cárdenas².**

RESUMEN

Se presenta un modelo basado en la ecuación de Rayleigh para simular la obtención de pisco utilizando una columna de destilación discontinua empacada de acero inoxidable sin reflujo a partir de mosto de uva quebranta del valle de Cañete. Los resultados del modelo se comparan con los datos experimentales obtenidos. Los resultados muestran que el modelo propuesto permite simular la producción de pisco.

Palabras clave: pisco, destilación discontinua, ecuación Rayleigh

SIMULATION OF THE OPERATION OF PRODUCTION OF PISCO IN A BATCH DISTILLATION COLUMN PACKED STAINLESS STEEL

ABSTRACT

It presents a model based on the Rayleigh equation to simulate the production of pisco using a batch distillation column packed stainless steel without reflux from grape quebranta of valley of Cañete. Model results are compared with experimental data. The results show that the proposed model can simulate the production of pisco.

Keywords: pisco, batch distillation, Rayleigh equation.

1 Departamento de Operaciones Unitarias, FQIQ, UNMSM. motinianoc@unmsm.edu.pe.

2 Departamento de Análisis y Diseño de Procesos, FQIQ, UNMSM.

3 Departamento de Química Orgánica, FQIQ, UNMSM.

4 Departamento de Procesos, FQIQ, UNMSM.

I. INTRODUCCIÓN

El pisco es una denominación que se reserva para la bebida alcohólica perteneciente a una variedad de aguardiente de uvas (brandy) que es producida en el Perú desde finales del siglo XVI. Es considerada la bebida destilada típica del Perú y es uno de los productos bandera peruanos. Por eso en el presente trabajo se ha considerado proponer un modelo basado en la Ecuación de Rayleigh para simular el comportamiento del mosto de uva fermentado durante la destilación y evaluar dicho modelo con los datos experimentales obtenidos con la destilación de mostos fermentados de uva quebranta procedentes de los valles de Cañete, en una columna de destilación empacada de acero inoxidable sin utilizar el reflujo.

II. MARCO TEÓRICO

Según el Reglamento de la Denominación de Origen del Pisco⁽¹⁾ define al pisco como el producto obtenido exclusivamente por destilación de mostos frescos de “uvas pisqueras” recientemente fermentados, utilizando métodos que mantengan los principios tradicionales de calidad; y producido en la costa de los departamentos de Lima, Ica, Arequipa, Moquegua y los Valles de Locumba, Sama y Caplina del departamento de Tacna.

Se reconocen los siguientes tipos de pisco de acuerdo al Reglamento de denominación de origen del pisco:

1. **Pisco puro:** es el pisco obtenido exclusivamente de una sola variedad de uva pisquera.
2. **Pisco mosto verde:** es el pisco obtenido de la destilación de mostos frescos de uvas pisqueras con fermentación interrumpida.
3. **Pisco acholado:** es el pisco obtenido de la mezcla de:
 - Uvas pisqueras, aromáticas y/o no aromáticas.
 - Mostos de uvas pisqueras aromáticas y/o no aromáticas.

- Mostos frescos completamente fermentados (vinos frescos) de uvas pisqueras aromáticas y/o no aromáticas.
- Piscos provenientes de uvas pisqueras aromáticas y/o no aromáticas.

De acuerdo al Reglamento de la Denominación del Origen del Pisco, el pisco debe ser elaborado exclusivamente utilizando las denominadas “uvas pisqueras” cultivadas en las zonas de producción reconocidas. Las uvas pisqueras son ocho (8) y son las siguientes:

1. Quebranta
2. Negra Criolla
3. Mollar
4. Italia
5. Moscatel
6. Albilla
7. Torontel
8. Uvina

Son uvas no aromáticas las uvas quebranta, negra criolla, mollar y uvina. Se consideran uvas aromáticas las uvas italia, moscatel, albilla y torontel.

El proceso de fermentación puede realizarse sin maceración o con maceración parcial o completa de orujos de uvas pisqueras, controlando la temperatura y el proceso de degradación de los azúcares del mosto. El inicio de la destilación de los mostos fermentados debe realizarse inmediatamente después de concluida su fermentación, a excepción del Pisco mosto verde, que se destila antes de concluida la fermentación de los mostos.

Sobre los equipos a utilizar el Reglamento de la Denominación del Origen del Pisco señala que la elaboración de pisco será por destilación directa y discontinua, separando las cabezas y colas para seleccionar únicamente la fracción central del producto llamado cuerpo o corazón. Los equipos serán fabricados de cobre o estaño; aunque se pueden utilizar pailas de acero inoxidable

MODELO TEÓRICO

Para simular el comportamiento de la destilación del mosto de la uva con el cual se obtendrá el pisco se propone que el alambique utilizado funciona en los términos de una destilación diferencial o destilación discontinua simple, la cual presenta las siguientes características:

- No hay reflujo.
- En cualquier instante, el vapor que deja el rehervidor con una composición basado en el componente más volátil se asume que está en equilibrio con la carga líquida perfectamente mezclada que está en el rehervidor.
- La composición del destilado recolectado varía con el tiempo.
- La composición del producto destilado es un promedio de los componentes recolectados.
- La composición del residuo que queda en el rehervidor varía con el tiempo.
- La temperatura del rehervidor varía con el tiempo.
- Hay una sola etapa de equilibrio que se da en el rehervidor.
- Mezcla perfecta para ambas fases líquida y vapor.
- Un tanque colector de destilado inicialmente vacío.
- Una velocidad constante de ebullición.

Se carga una mezcla inicial W_0 en moles de composición x_{w_0} en el rehervidor. Se comienza a calentar la mezcla la cual se va vaporizando, el vapor D que sale

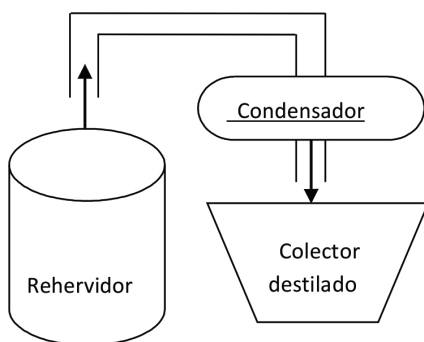


Figura N° 1. Esquema de la destilación simple.

del rehervidor tiene una composición instantánea y_D . El vapor se condensa al pasar por el condensador y se recolecta el destilado líquido D_{promedio} en moles con una composición promedio $y_{D\text{promedio}}$. En el rehervidor va quedando la mezcla líquida W en moles con una composición x_w , la cual va variando con el tiempo.

Para cualquier componente en la mezcla la velocidad instantánea de salida o de destilado es igual a la velocidad de agotamiento en el rehervidor por lo que un balance de materia en cualquier instante en el sistema:

$$\frac{d}{dt}(Wx_w) = -Dy_D$$

Esta es la llamada Ecuación de Rayleigh que se aplica a la destilación discontinua simple. Con esta última ecuación podemos simular el comportamiento del mosto de uva en el rehervidor durante la destilación, considerando que el pisco tiene una composición química promedio de etanol en un 42% en volumen y agua de 57.8% en volumen siendo el resto de componentes minoritarios^[3]. Por lo que podemos considerar al pisco como una mezcla binaria compuesta principalmente de agua y etanol.

Si la ecuación de Rayleigh se aplica a una mezcla binaria se tendrá.

$$Wdw + x_w dW = y_D(-Ddt)$$

$$y_D(-Ddt) = y_D dW$$

$$Wdw + x_w dW = y_D(-Ddt)$$

$$\int_{x_{w_0}}^{x_w} \frac{dx_w}{y_D - x_w} = \int_{W_0}^W \frac{dW}{W}$$

Integrando:

$$\int_{x_{w_0}}^{x_w} \frac{dx_w}{y_D - x_w} = \ln\left(\frac{W}{W_0}\right)$$

Para el sistema etanol-agua se tiene los siguientes datos de equilibrio a presión atmosférica^[2].

Tabla N° 1. Datos de equilibrio del sistema agua-etanol

| x | y | T (°C) |
|-------|-------|--------|
| 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| 1.90 | 17.00 | 95.50 |
| 7.21 | 38.91 | 89.00 |
| 9.66 | 43.75 | 86.70 |
| 12.38 | 47.04 | 85.30 |
| 16.61 | 50.89 | 84.10 |
| 23.37 | 54.45 | 82.70 |
| 26.08 | 55.80 | 82.30 |
| 32.73 | 58.26 | 81.50 |
| 39.65 | 61.22 | 80.70 |
| 50.79 | 65.64 | 79.80 |
| 51.98 | 65.99 | 79.70 |
| 57.32 | 68.41 | 79.30 |
| 67.63 | 73.85 | 78.74 |
| 74.72 | 78.15 | 78.41 |
| 89.43 | 89.43 | 78.15 |

Para hacer la integración analítica de la Ecuación de Rayleigh haremos uso de los datos de equilibrio del sistema agua-etanol en el rango de concentraciones de interés desde un rango de fracción molar de etanol (x) de 0 a 12.38. Por lo que se hizo una correlación de los datos de equilibrio del sistema dando:

$$y_D = -34.406 x_w^2 + 7.9825 x_w$$

en el rango de $0 \leq x \leq 12.38$

Con lo cual reemplazando en la ecuación de Rayleigh da:

$$\int_{x_{w0}}^{x_w} \frac{dx_w}{6.9825x_w - 34.40x_w^2} = \ln\left(\frac{W}{W_0}\right)$$

$$\int_{x_{w0}}^{x_w} \frac{dx_w}{7.9825x_w - 34.40x_w^2 - x_w} = \ln\left(\frac{W}{W_0}\right)$$

$$\int_{x_{w0}}^{x_w} \frac{dx_w}{x_w(6.9825 - 34.40x_w)} = \ln\left(\frac{W}{W_0}\right)$$

Integrando dicha ecuación se tiene finalmente:

$$\left(\frac{1}{6.9825}\right) \left[\ln\left(\frac{x_w}{x_{w0}}\right) - \ln\left(\frac{6.9825 - 34.4x_w}{6.9825 - 34.4x_{w0}}\right) \right] = \ln\left(\frac{W}{W_0}\right)$$

Con esta ecuación se hará el seguimiento de la destilación del mosto de uva quebranta en la columna de destilación empacada sin reflujo. Se hará el contraste con los datos experimentales de las corridas realizadas.

SECCIÓN EXPERIMENTAL

Las columnas empacadas son los más adecuados para destilar el vino en alambiques por lotes, ya que tienen una gama más amplia de operaciones de estabilidad hidráulica. Por lo que se propone utilizar un equipo de destilación discontinua que cuenta con un rehervidor unido a una columna empacada y un sistema de reflujo, todo el equipo está hecho de acero inoxidable. Dicho equipo se encuentra ubicado en el Laboratorio N.º 122 del Departamento de Operaciones Unitarias. En el presente trabajo no se utilizará el sistema de reflujo de acuerdo al Reglamento de Denominación de Origen del Pisco, tal como se muestra en el esquema siguiente:

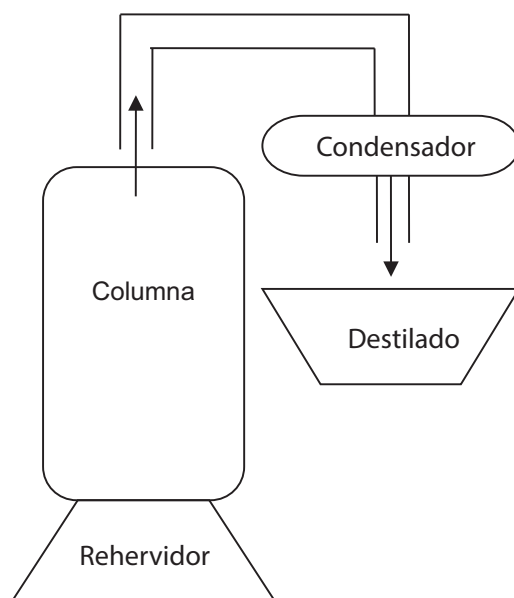


Figura N.º 2. Esquema de la columna de destilación empacada de acero inoxidable.

La columna de destilación discontinua empacada a utilizarse tiene como características principales:

- El rehervidor está hecho de acero inoxidable y tiene una capacidad de 30 litros. Cuenta con una resistencia de 2000 W colocada en su interior para el calentamiento de las mezclas.
- La columna empacada en sí tiene unas dimensiones de un metro y treinta centímetros de altura y un diámetro de quince centímetros. Dentro de la columna se rellena todo con anillos Raschig también de acero inoxidable.
- Se cuenta también con un condensador total hecho de acero inoxidable que permite condensar el vapor que pase por la columna empacada. Este condensador está ubicado encima de la columna y tiene conexiones para que entre agua de enfriamiento para que se cumpla su objetivo de condensar el vapor.
- Encima de la columna está el sistema de reflujo que está conectado con válvulas que permite el paso del líquido condensado ya sea hacia la misma columna o sale como destilado, que para el caso de la obtención del pisco no fue utilizado el sistema de reflujo.
- En el rehervidor se colocó una termocupla que permitió hacer el seguimiento de la temperatura durante la operación.
- Toda la columna incluyendo el rehervidor, la misma columna y el condensador mide en total cerca de dos metros y cuarenta centímetros.
- Toda la columna está hecha de acero inoxidable lo que impide que reaccione con la mezcla o tenga algún tipo de intervención en la destilación.
- La columna de destilación empacada operó sin reflujo por lo tanto la columna se comportó como una columna de destilación discontinua simple o diferencial.

Para las corridas experimentales se utilizaron:

- Mosto de la variedad de uva Quebranta procedentes de los valles de Cañete. Los mostos fueron fermentados con

levaduras especiales (Lalvin) de origen canadiense, que dió un grado alcohólico de 13°.

- Para medir el grado alcohólico de las muestras de destilado que se obtuvieron se utilizó un alcoholímetro de vidrio que permite determinar directamente el porcentaje en volumen de alcohol en una mezcla hidroalcohólica.
- Para la toma de la temperatura en el rehervidor se utilizó una termocupla unida a un instrumento marca COLE PARMER para la visualización de la temperatura en °C.
- Se tiene que considerar que el sistema agua-etanol son consideradas mezclas no ideales, donde la aditividad de volúmenes no se da. Si se mezcla un volumen de agua y un volumen de etanol, el volumen resultante es menor, debido a que se forman uniones de hidrógeno lo que produce una formación molecular más estrecha, reduciéndose el volumen final.
- La ecuación de Rayleigh está expresada en fracciones molares del etanol y los datos recogidos en la corrida experimental están en grados alcohólicos, que es en realidad una medida de volumen de etanol, se hará la conversión correspondiente de fracciones molares a % en volumen y viceversa. Para lo cual se utilizará los siguientes datos^[2]:

Densidad del agua a 20°C : 0.999 g/mL.

Densidad del etanol a 20°C: 0.789 g/mL.

Peso molecular del agua: 18.0152 g/mol.

Peso molecular del etanol: 46.0634 g/mol.

III. RESULTADOS

La corrida experimental se hizo con mosto de uva Quebranta en una cantidad de 7300 mL con un grado alcohólico de 13°, lo que equivale a una fracción molar de etanol inicial de $x_{w0} = 0.044$. Los primeros 200 mL fueron desechados ya se considera que tienen un alto contenido de metanol con un grado alcohólico de 68°. Los resultados de la destilación se muestran a continuación en la Tabla N° 5 donde en una columna se tienen los tiempos en que se tomaron las

muestras de destilado, el correspondiente valor del grado alcohólico y en la tercera columna se tienen los datos de la temperatura del rehervidor.

De acuerdo a los resultados que se muestran en la tabla se obtuvo un total de 1000 mL de pisco con un promedio final de grado alcohólico de 49°. Se desechó tanto el resto del destilado ya que tenía un grado alcohólico por debajo del requerido, así como el resto del mosto del rehervidor ya que tenía 0° de alcohol.

Tabla N° 2. Datos de la corrida experimental

| Tiempo (min) | Grado alcohólico destilado | Temperatura rehervidor (°C) |
|--------------|----------------------------|-----------------------------|
| 0 | | 92.0 |
| 3 | 62 | 93.0 |
| 4 | 60 | 93.3 |
| 8 | 56 | 94.0 |
| 12.30 | 51 | 94.7 |
| 17.35 | 44 | 95.6 |
| 23.10 | 38 | 96.4 |
| 28.35 | 30 | 97.2 |
| 34.16 | 16 | 97.8 |

Con los datos obtenidos se realizó los cálculos correspondientes para obtener el grado alcohólico del destilado acumulado, que se muestran en la tabla N° 3.

Tabla N° 3. Resultados de la corrida experimental

| Tiempo (minutos) | Grado alcohólico Destilado promedio |
|------------------|-------------------------------------|
| 3 | 62.7 |
| 4 | 61.7 |
| 8 | 60.0 |
| 12.30 | 57.9 |
| 17.35 | 55.3 |
| 23.10 | 52.5 |
| 28.35 | 49.4 |
| 34.16 | 45.2 |

A continuación se utiliza el modelo propuesto, para evaluarlo se toma los datos de la corrida experimental. Así se toma en cuenta la cantidad inicial de 7300 mL de mosto con un grado alcohólico de 13°, que haciendo el cálculo correspondiente para utilizar la ecuación de Rayleigh, en moles iniciales $W_0 = 330.637$ moles y una concentración inicial de $x_{w0} = 0.044$. El promedio del destilado en la operación fue de 1.743 moles/minuto. También se muestran los resultados de la estimación de la temperatura del rehervidor en base a los resultados de las concentraciones del etanol que queda en el rehervidor. El modelo permite calcular las moles que quedan en el rehervidor W y su respectiva concentración x_w . Los tiempos fueron estimados en base al destilado promedio de la operación utilizando la siguiente ecuación:

$$t = \frac{(W_0 - W)}{D}$$

La concentración del destilado promedio fueron calculadas con la siguiente ecuación:

$$y_{D\text{promedio}} = \frac{(x_{w0}W_0 - x_w W)}{D_{\text{acumulado}}}$$

Los datos de temperatura se calcularon en base a una correlación de los datos que se muestran en la tabla N.º 1.

Los resultados se muestran en la tabla N.º 4:

Tabla N° 4. Resultados utilizando el modelo propuesto

| Tiempo (min) | Grado alcohólico Destilado promedio | Temperatura rehervidor (°C) |
|--------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| 3.237 | 55.18 | 92.68 |
| 7.560 | 53.38 | 93.43 |
| 12.285 | 51.43 | 94.21 |
| 17.562 | 49.22 | 95.03 |
| 23.638 | 46.67 | 95.88 |
| 30.957 | 43.62 | 96.77 |
| 40.476 | 39.78 | 97.70 |

En la figura N.º 3 se presenta la comparación del comportamiento de la temperatura del rehervidor con el tiempo entre los datos obtenidos experimentalmente y la temperatura obtenida utilizando el modelo propuesto. Se

puede notar que el modelo permite predecir la tendencia del comportamiento de la temperatura del rehervidor, si bien existe una pequeña diferencia entre ambas curvas.

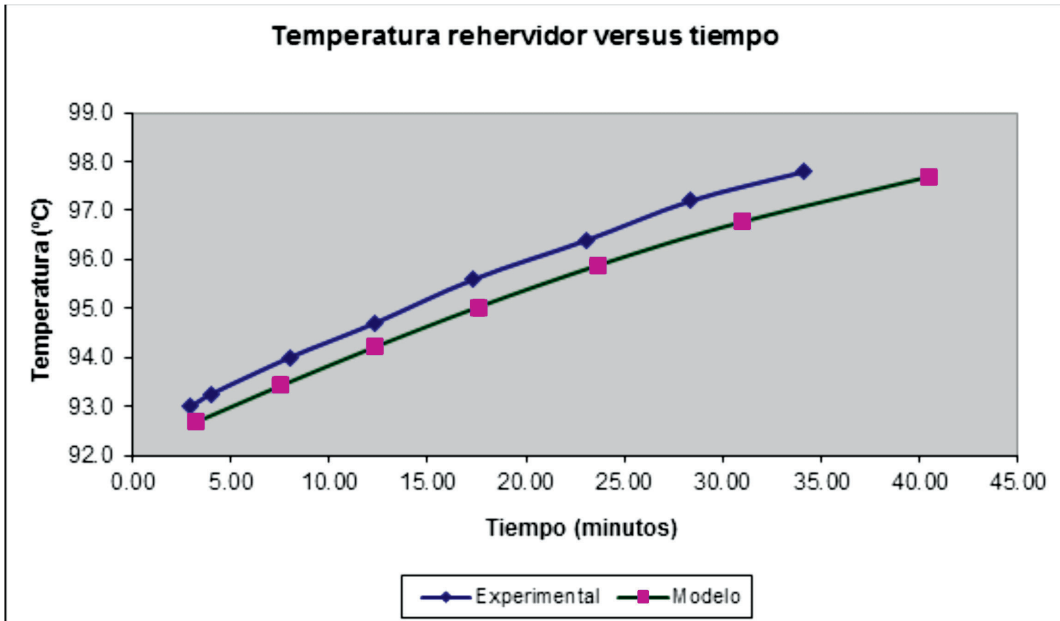


Figura N.º 3. Comportamiento de la temperatura del rehervidor.

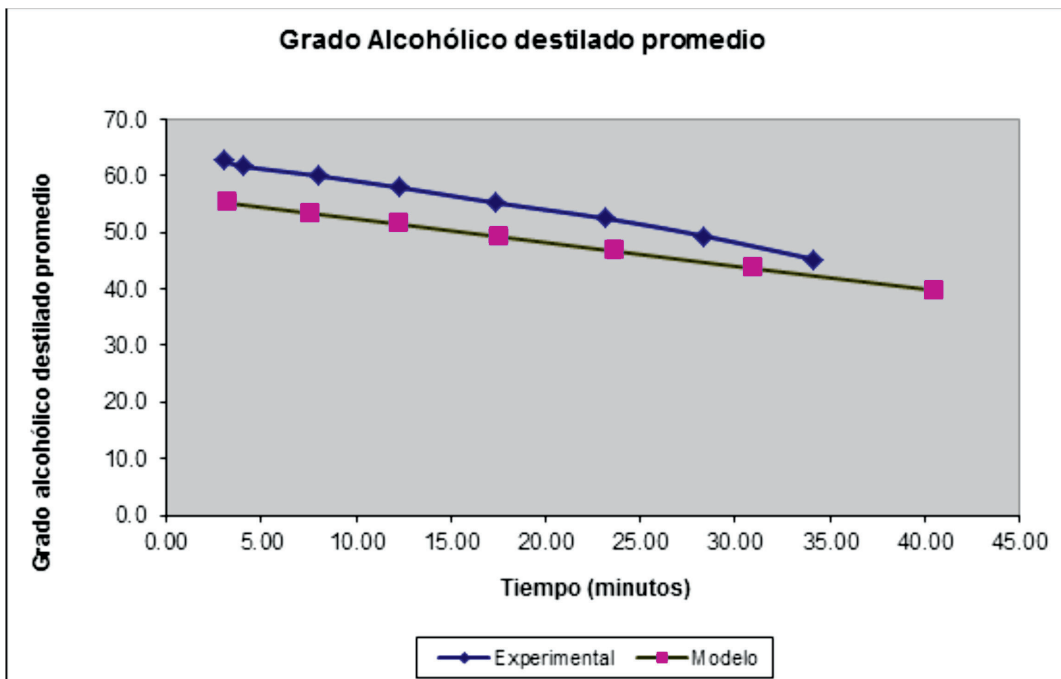


Figura N.º 4. Grado alcohólico promedio.

Lo mismo se hace comparando el grado alcohólico del destilado acumulado tanto los resultados experimentales con los resultados que se obtienen del modelo propuesto. Como se muestra en la figura N.º 4 si bien hay diferencia en los resultados, si coinciden en cuanto a la tendencia de los datos. Esto permite estimar el tiempo necesario para obtener la concentración del pisco acumulado y que no supere el límite mínimo de 38° y no supere el límite máximo de 48° de acuerdo con el Reglamento^[1].

IV. CONCLUSIONES

Se ha propuesto un modelo para simular el comportamiento de la destilación del mosto de uva en una columna de destilación discontinua de acero inoxidable que opera sin reflujo, basado en la ecuación de Rayleigh.

Se ha obtenido en base a los datos del sistema agua-etanol una ecuación integrada que permite realizar los cálculos de manera más sencilla.

Los resultados del modelo propuesto comparando con los resultados experimentales permite estimar el comportamiento de la destilación del mosto de uva quebranta.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Reglamento de la Denominación de Origen del Pisco. Lima: Indecopi 2012.
- [2] Perry R., Green D. Manual del Ingeniero Químico. Madrid: Editorial McGraw-Hill/ Interamericana de España; 2001.
- [3] Agenda Química Virtual. Pisco: El aguardiente de uva de Perú. Publicado 30 enero de 2011.
- [4] Iñiguez J. Algunas consideraciones teórico-prácticas sobre la destilación intermitente en alambique simple de mostos fermentados y ordinarios. Parte I: Algunas definiciones y conceptos fundamentales, Revista Ingeniería Primero 2010; 17; 31 – 51.
- [5] Aleixandre Benavent J.L., Aleixandre Tudó J.L. Manual de Vinos y Bebidas. México: Editorial Limusa; 2011.