

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA  
UNAN – LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS**



**TÍTULO:**

**BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA EN EL PROCESO DE  
PRODUCCIÓN DE ALCOHOL EN COMPAÑÍA LICORERA DE  
NICARAGUA S.A. FEBRERO – JUNIO 2005.**

**TÉISIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
INGENIERO DE ALIMENTOS.**

**AUTOR:  
BR. ERICKSON JAVIER CANO MENDOZA.**

**TUTOR:  
MBA. MARÍA ELENA VARGAS ZAMBRANA.**

**ASESORES:  
ING. SERGIO LUGO MAYORGA.  
LIC. TOMAS ANTONIO CANO TÓRREZ**

**LEÓN, AGOSTO DEL 2005.**

## INDICE

**RESUMEN**

**DEDICATORIA**

**AGRADECIMIENTO**

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>2</b>
<b>ANTECEDENTES.....</b>	<b>3</b>
<b>JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>4</b>
<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>5</b>
<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>17</b>
<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>20</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>37</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>38</b>
<b>GLOSARIO DE TERMINOS.....</b>	<b>39</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>42</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>43</b>

## RESUMEN

El presente trabajo es un estudio experimental basado en la determinación de los requerimientos de masa en las etapas de mezclado en línea, prefermentación, fermentación y destilación, así como el calor generado en las etapas de fermentación y destilación de alcoholes.

Este trabajo se realizó con el interés de la empresa de evaluar la eficiencia del sistema de destilación a vacío y determinar la cantidad total de búnker que se está utilizando, ahora que la empresa está trabajando con un biodigestor. Otra de las razones importantes por las cuales se hizo este estudio fue por el traslado de la empresa hacia el Ingenio San Antonio, ya que los cálculos realizados le servirán a la misma para determinar el costo de producción del alcohol, cuánto cuesta el traslado, en cuánto tiempo van a recuperar la inversión de la reubicación, entre otros cálculos financieros.

El trabajo inició con la investigación de el fundamento de operación de cada una de las etapas del proceso en estudio, de tal manera que se pudieran identificar las corrientes de entrada y salida involucradas en cada una de ellas, luego se determinaron las bases de cálculos considerando de gran importancia conocer el principio de la conservación de la masa y energía, ya que sin éste no podría ser posible la realización de estos cálculos.

Para realizar los cálculos se utilizaron algunos datos proporcionados por el laboratorio de la empresa, tales como el porcentaje de lodos, la densidad del mosto, la capacidad calorífica del mosto, la densidad del alcohol, la capacidad calorífica del alcohol y su grado alcohólico.

Los resultados que se obtuvieron en este estudio corresponden al promedio de tres determinaciones de masa en cada una de las etapas del proceso de producción de alcohol y tres cálculos de la cantidad de calor en la fermentación y destilación de alcohol. Finalmente se realizó una comparación de la cantidad de búnker que se requiere para el proceso de producción de alcohol tomando en cuenta la cantidad de gas metano que sustituye al búnker, identificando un 65% de ahorro en la utilización del mismo.

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo se lo dedico a:

A mi padre el Lic. Tomas Cano que con su esfuerzo, consejos y educación hizo posible que pudiera culminar mis estudios.

A mi madre Mercedes Mendoza por mostrar su abnegación y preocupación en todo momento durante mis estudios.

A mis hermanos Rafael, Roberto, y Tomas Cano Mendoza que siempre estuvieron apoyándome y aconsejándome en las situaciones más complejas de mi carrera.

A la señorita Tania Valdivia que siempre me brindó su apoyo en todo momento, y me recordó que todo es posible teniendo presente siempre a Dios.

**Br. Erickson Javier Cano Mendoza.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer primeramente a Dios nuestro creador, por darme la fortaleza, la sabiduría y la confianza en mí para poder culminar mis estudios.

A Compañía Licorera de Nicaragua S. A. por haber hecho posible la realización de este trabajo, brindándome la oportunidad de acceder a las diferentes etapas de la producción de alcoholes.

A mí padre que como responsable del departamento me dedico un poco de su tiempo para llevar a cabo este trabajo.

A la MBA. María Elena Vargas y al Ing. Sergio Lugo, por ser mis tutores y brindarme su dedicación para la culminación de este trabajo.

Al personal de producción por brindarme la información necesaria para hacer este estudio.

Y finalmente a mis compañeros y amigos que me dieron su apoyo durante todos los años de mi carrera.

**Br. Erickson Javier Cano Mendoza.**

## INTRODUCCIÓN

Compañía Licorera de Nicaragua S. A., es una institución cien por ciento Nicaragüense, nace en 1,890 con la construcción de la primera destilería, constituida ante el notario público el 15 de Julio de 1,959. Las propiedades de las instalaciones se encuentran en la ciudad de Chichigalpa, Departamento de Chinandega, cuyo objetivo primordial es la industria y el comercio, que desde entonces se ha dedicado a producir alcoholes de la más alta calidad, utilizando tecnología avanzada y amigable con el medio ambiente.

Su sede radica en Managua, Nicaragua y posee oficinas en Miami, Florida, la cual se encarga de comercializar su marca internacionalmente.

Desde 1,990 esta Compañía, ha demostrado, que la búsqueda de mejores tecnologías, puede ayudar a mantener o mejorar la calidad, tanto del producto como del medio ambiente y al mismo tiempo reducir los costos de producción como resultado de la exitosa implementación de un sistema de destilación al vacío, alternativas como la instalación de un segundo sistema de múltiples efectos y un sistema de recuperación de calor de las purgas continuas de las calderas para calentar el agua de alimentación a cada caldera.

Otro de los avances de esta empresa, es la planta procesadora y purificadora de gas carbónico ( $\text{CO}_2$ ), a partir de la fermentación de la melaza, que nace como una oportunidad para aprovechar los subproductos generados en la misma y obtener un valor agregado, como también por el interés de la compañía en controlar las emisiones de gases de efectos de invernaderos al medio ambiente y con ello contribuir a mantener el equilibrio ecológico.

Actualmente trabaja con un biodigestor que constituye un avance más que la Compañía Licorera ha desarrollado con el propósito de dar tratamiento al subproducto de la destilación conocido como vinaza, cuyo alto contenido orgánico es aprovechado para la producción de biogás mediante la acción de bacterias anaeróbicas en el biodigestor. Este sistema permite mediante el tratamiento de las aguas residuales, la generación de gas metano, para sustituir el consumo de búnker, que es utilizado en las calderas para producir el vapor necesario en el proceso de producción.

El presente estudio consiste en la determinación de los requerimientos de masa en las etapas de mezclado en línea, prefermentación, fermentación y destilación, así como las necesidades de energía en la etapa de fermentación y destilación del proceso de elaboración de alcohol considerando que la Compañía Licorera de Nicaragua S. A. está trabajando con el biodigestor a su máxima capacidad.

## **OBJETIVOS**

General:

- ❖ Determinar los requerimientos de masa en las etapas de mezclado en línea, prefermentación, fermentación y destilación, así como la cantidad de energía necesaria en las etapas de fermentación y destilación en el proceso de elaboración de alcohol de la Compañía Licorera S.A.

Específicos:

- ❖ Definir la base de cálculo para cada una de las etapas del proceso de elaboración de alcohol.
- ❖ Determinar los flujos máxicos en las etapas de mezclado en línea, prefermentación, fermentación y destilación.
- ❖ Determinar la cantidad de calor en las etapas de fermentación y destilación del proceso de elaboración de alcohol.
- ❖ Estimar la cantidad de búnker que se requiere en el proceso de producción del alcohol, tomando en cuenta el gas metano generado por el biodigestor.

## ANTECEDENTES

Compañía Licorera de Nicaragua S.A. desde su fundación en 1,838 hasta el año de 1,991, utilizó el método de destilación atmosférico, el cual para su producción de 127,506.84Kg/día de alcohol demandaba 41,880Kg/día de vapor, estos eran generados por 14,352.48gal/día de Bunker. Esta Compañía en vista de mejorar los costos de producción y aumentar su mercado, decidió cambiar este sistema por un sistema de destilación a vacío que le disminuyera el consumo de Bunker. Este sistema ha estado trabajando desde 1992 hasta el año 2002, reduciendo los galones de Bunker hasta un 50% con respecto al sistema anterior que funcionaba con el método de destilación atmosférico.

En el año 2003 Compañía Licorera de Nicaragua S.A. instaló un biodigestor con el objetivo de darle un tratamiento adecuado, mediante la biodegradación de la materia orgánica, al efluente de la destilación conocido como vinaza. Así mismo, obtener un valor agregado del biogás producido, el cual está compuesto en un 60% por gas metano y se quema en las calderas para generar el vapor que la planta de destilación necesita. Debido a que la biodigestión es un proceso biológico, el biodigestor para alcanzar su máxima producción requiere de mucho tiempo, por esta razón al momento de evaluar su desarrollo al cabo de un año de funcionamiento, dio como resultado que su inversión no generó ni pérdidas ni ganancias para la empresa.

Fue hasta el año 2004 e inicio del año 2005 que el sistema de biodigestión alcanzó la máxima producción para la cual está diseñado, desconociéndose con exactitud la cantidad de búnker que se está ahorrando con este sistema actualmente. El departamento de finanzas de la Compañía Licorera S.A. lo único que conoce a través de su plan de abastecimiento de Bunker es un ahorro de 5000gal/día de este combustible, lo cual lo atribuyen a la sustitución del mismo por gas metano, producido por el biodigestor. Para éste año se desconocen los flujos de masa y energía en el proceso de producción de alcohol que permitan determinar la cantidad de búnker que se está requiriendo para la producción de vapor necesario en el desarrollo eficiente del proceso productivo.

## **JUSTIFICACIÓN**

Compañía Licorera de Nicaragua S. A., actualmente trabaja con el sistema HACCP, y está certificada con las Normas ISO 9000, ISO 14000 y KOSHER, convirtiéndola en una empresa comprometida a la búsqueda de la mejora continua de sus procesos.

La rentabilidad y la calidad son dos elementos que, si se alcanzan en una empresa, aseguran el futuro de la misma.

Para llegar a obtener un producto de calidad, se requiere de una materia prima, insumos y de un proceso eficientemente controlado que permita lograr productos con las especificaciones de calidad establecidas y a la vez asegurar los mejores rendimientos.

Compañía Licorera S.A. para ser más competitiva económicamente su participación en el negocio de los alcoholes dentro del Tratado de Libre Comercio (CAFTA), ha decidido trasladar sus instalaciones al Ingenio San Antonio, por lo cual necesita realizar el cálculo de los requerimientos másicos y energéticos del proceso de producción de alcohol. Con estos cálculos la empresa actualizará los costos de producción del alcohol, estimará la eficiencia del proceso fermentativo, evaluará la productividad del sistema de destilación a vacío y medirá los beneficios económicos y ambientales que este sistema les ha generado. La información obtenida de este estudio, será de utilidad en la planificación del funcionamiento en las nuevas instalaciones en el Ingenio San Antonio.

## MARCO TEÓRICO

### Principio de Conservación de la Masa:

**Conservación de la Masa:** un sistema se refiere a una sustancia o grupo de sustancias bajo consideración y un proceso a los cambios que tienen lugar dentro del sistema. Así, hidrógeno, oxígeno y agua pueden constituir un sistema, y la combustión de hidrógeno para formar agua, el proceso. Un sistema puede ser una masa de materia contenida dentro de una sola vasija y completamente aislada de los alrededores, o puede incluir toda la masa y energía comprendida en un proceso químico complejo contenida en muchas vasijas y conductos que las unen y en asociación con los alrededores. En un sistema aislado los límites del sistema están definidos por una masa determinada de materia y su contenido en energía está completamente separado de toda la otra materia y energía. Dentro de un sistema aislado la masa del sistema permanece constante, independiente de los cambios que tengan lugar dentro del sistema. Esta afirmación se conoce como principio de la conservación de la masa y es la base del llamado balance de materia de un proceso.

El estado de un sistema se define por numerosas propiedades que se clasifican como extensivas si dependen de la masa que se considere e intensivas si son independientes de la masa. Por ejemplo el volumen es una propiedad extensiva, mientras que la densidad y la temperatura son propiedades intensivas.

En el sistema hidrógeno, oxígeno y agua sometido a un proceso de combustión, la masa total en el sistema aislado permanece la misma. Si la reacción tiene lugar en una vasija y el hidrógeno y oxígeno se suministran a la vasija y los productos se retiran de ella, entonces las corrientes de entrada y salida deben incluirse como parte del sistema en orden a aplicar el principio de conservación de la masa o en el establecimiento de un balance de materia. El principio de conservación de la masa puede extenderse y aplicarse a la masa de cada elemento en un sistema. Así en el sistema aislado de hidrógeno, oxígeno y agua sometido al proceso de combustión, la masa del hidrógeno en su forma molecular, atómica y combinada permanece constante. Esto mismo es verdadero para el oxígeno.

En un sentido universal el principio de conservación se aplica al contenido en energía total de un sistema cerrado y no a su masa. Por emisión de energía radiante y por la transmutación de los elementos la masa de un sistema puede parcialmente convertirse en energía. En procesos de fisión y condensación nuclear el principio de conservación de masa se invalida, pero en procesos industriales ordinarios se acepta como riguroso.

Puesto que la palabra peso se aplica en la literatura de ingeniería como sinónimo de masa, en la práctica seguiremos refiriéndonos frecuentemente a pesos de materia en vez de emplear el término más exacto de masa como medida de cantidad. Pesos y masas son numéricamente iguales sólo en un lugar donde la constante de gravitación tiene el valor normal de  $9,806 \text{ m/seg}^2$  ó  $32,174 \text{ ft/seg}^2$ . La variación en el peso de una masa dada sobre la superficie de la tierra es despreciable para el trabajo ordinario de ingeniería.

## **Principio de Conservación de la Energía:**

**Energía:** las propiedades de una bola que se mueve, un péndulo que oscila o un volante que gira son diferentes de las de los mismos objetos en reposo. Las diferencias residen en los movimientos de los cuerpos y la capacidad de los objetos que se mueven para realizar trabajo, que se define como la acción de una fuerza en movimiento restringido a lo largo de una distancia. Asimismo, las propiedades de una barra de metal caliente al rojo son diferentes a las mismas de las barras de metal cuando está fría. La barra al rojo produce efectos en los ojos y en el tacto muy diferentes de los de la barra fría.

Bajo la clasificación de energía potencial se incluyen todas las formas no asociadas con movimientos sino que resultan de la posición y agrupamiento de la materia. La energía que posee un peso levantado, un muelle comprimido, una batería de acumuladores cargados, un tanque de gasolina, o un montón de carbón, es energía potencial. Similarmente, se almacena energía potencial dentro de un átomo como resultado de las fuerzas de atracción entre sus partes subatómicas. Así, la energía potencial puede clasificarse además como energía potencial externa, que es inherente a la materia como resultado de su posición relativa a la Tierra, o como energía potencial interna, que reside dentro de la estructura de la materia.

En contraste con esto, la energía asociada con el movimiento se denomina energía cinética. La energía representada por la corriente de un río, el recorrido de una bala o la rotación de un volante es energía cinética. También las moléculas individualmente poseen energía cinética en virtud de sus movimientos de traslación, rotación y vibración. Igual que la energía potencial, la energía cinética se subclasifica en energía cinética interna, tal como la asociada a la estructura molecular y atómica, y en energía cinética externa, a la asociada al movimiento externo.

Además de las formas de la energía asociadas a la composición, posición y movimiento de la materia, existe energía en forma de electricidad, magnetismo y radiación, que están asociadas a fenómenos electrónicos.

La ciencia relativa a la transformación de una forma de energía en otra se denomina termodinámica. Estudios antiguos de la transformación de energía conducen a la conclusión de que, aunque la energía puede transformarse de una forma a otra, nunca puede destruirse, y que la energía total del universo es constante. A este principio de conservación de la energía se le designa como primer principio de la termodinámica. Muchas verificaciones experimentales han servido para establecer la validez de esta ley.

**Temperatura y calor:** la energía puede transferirse no solo de una forma a otra sino también de una agregación de la materia a otra sin cambiar la forma de la energía. La transformación de energía de una forma a otra o la transferencia de energía de un cuerpo a otro siempre necesita de la influencia de una fuerza motriz. Por ejemplo, si una barra de metal caliente se coloca en contacto con una fría, la primera se enfriará y la última se calentará. El sentido de “caliente” es una indicación de la energía interna de la materia. La fuerza motriz que produce una transferencia de energía interna se denomina temperatura y a la forma de energía que se transfiere de un cuerpo a otro como resultado de una diferencia de temperatura se denomina calor.<sup>4</sup>

## **Las tablas de vapor:**

Las tablas de las funciones de entalpía y energía interna más completas y precisas que se conocen son las reportadas para agua. Esto ocurre debido a que el agua es una sustancia común y porque, especialmente en su estado de vapor, ha sido el principal fluido de trabajo para máquinas tales como los motores y las turbinas de vapor. El diseño correcto de dichas máquinas requiere de valores precisos de dichas funciones de estado y de la ecuación de estado correspondiente.

Recordemos que el agua puede existir en fase sólida, líquida o vapor, y que, dentro de ciertas condiciones, dichas fases pueden coexistir en equilibrio. A una presión determinada, se conoce como líquido no saturado al agua líquida que se encuentra abajo de su temperatura de ebullición o de saturación; se le llama líquido saturado al agua líquida en su temperatura de ebullición. Al vapor producido en el punto de ebullición se le llama vapor saturado; cuando un vapor se calienta más allá de su temperatura de saturación, se le llama vapor sobrecalentado.

### **Capacidad calorífica:**

La capacidad calorífica del agua y de todas las sustancias es una función de la temperatura y la presión, ya que la función de entalpía de donde se deriva  $C_p$  es dependiente de la temperatura y de la presión. Por lo tanto, los datos de  $C_p$  debieran reportarse, en principio, en tablas de dos dimensiones, como las usadas para la entalpía del vapor sobrecalentado. Sin embargo, convencionalmente se tabula o correlaciona a los valores de  $C_p$  a una presión de referencia fija, únicamente como función de temperatura y, como veremos, se efectúan cálculos separados de corrección por presión.

### **Entalpía de mezcla:**

Para la mayoría de las sustancias se dispone únicamente de datos de entalpía del componente puro, ya sea en forma de tablas (como las del agua), o de correlaciones de capacidades caloríficas y de calores de transición de fase. En esta sección veremos la forma en que pueden calcularse las entalpías de las mezclas, a partir de la información de los componentes puros.

Mezclas ideales: la manera más deseable de calcular las propiedades extensivas de una mezcla (como su entalpía), correspondería simplemente a sumar las propiedades extensivas de los componentes puros. Por ejemplo, sería muy conveniente que pudiera calcularse la entalpía de una mezcla  $H_{mezcla}$ , como la suma de las entalpías de los componentes,  $H_s$ , que es una forma análoga al cálculo de la entalpía de un vapor húmedo. Una mezcla que obedece esta regla de mezclado de propiedades se llama mezcla ideal.

La regla ideal de mezclado solo se satisface estrictamente en el caso de mezclas de gases de baja densidad y mezclas líquidas diluidas. Para mezclas en general debe modificarse esta regla de mezclado e incluir un término de corrección  $\Delta H_{mezcla}$  que se llama calor de mezclado.

El nombre del calor de mezclado se deriva del hecho de que, si el mezclado se lleva a cabo en un proceso a presión y temperatura constantes, entonces el efecto calorífico observado corresponderá a este término de corrección.<sup>3</sup>





**Ilustración 1. Prefermentador.**

La determinación de la densidad del mosto se realiza utilizando la tabla que se detalla en la siguiente página.

Peso por unidad de volumen y peso de sólidos (Brix) por unidad de volumen de las soluciones de azúcar a 20 °C

(Ampliada, 1943, por Meade a partir de la tabla de Snyder y Hammond, NBS—C440, 1942, p. 644)

(1)	(2)		(3)		(1)	(2)		(3)	
Gra- dos Brix	Peso (libras) al aire de		Sólidos en libras (Brix) por		Gra- dos Brix	Peso (libras) al aire de		Sólidos en libras (Brix) por	
	1 pie <sup>3</sup>	1 galón	1 pie <sup>3</sup>	1 galón		1 pie <sup>3</sup>	1 galón	1 pie <sup>3</sup>	1 galón
0.0	62.253	8.322	0.000	0.000	10.0	64.744	8.655	6.474	0.866
.2	62.298	8.328	.125	.017	.2	64.796	8.662	6.609	.883
.4	62.350	8.335	.249	.033	.4	64.849	8.669	6.744	.902
.6	62.395	8.341	.374	.050	.6	64.894	8.675	6.879	.820
.8	62.447	8.348	.500	.067	.8	64.946	8.682	7.014	.938
1.0	62.492	8.354	.625	.084	11.0	65.006	8.689	7.151	.956
.2	62.545	8.361	.751	.100	.2	65.051	8.696	7.286	.974
.4	62.590	8.367	.876	.117	.4	65.103	8.703	7.422	.992
.6	62.642	8.374	1.002	.134	.6	65.155	8.710	7.558	1.010
.8	62.687	8.380	1.128	.151	.8	65.208	8.717	7.695	1.029
2.0	62.739	8.387	1.255	.168	12.0	65.260	8.724	7.831	1.047
.2	62.784	8.393	1.381	.185	.2	65.312	8.731	7.968	1.065
.4	62.836	8.400	1.508	.202	.4	65.365	8.738	8.105	1.083
.6	62.881	8.406	1.635	.219	.6	65.417	8.745	8.243	1.102
.8	62.934	8.413	1.762	.236	.8	65.470	8.752	8.380	1.120
3.0	62.978	8.419	1.889	.253	13.0	65.522	8.759	8.518	1.139
.2	63.031	8.426	2.017	.270	.2	65.574	8.766	8.656	1.157
.4	63.076	8.432	2.145	.287	.4	65.627	8.773	8.794	1.176
.6	63.128	8.439	2.273	.304	.6	65.680	8.781	8.933	1.194
.8	63.180	8.446	2.401	.321	.8	65.739	8.788	9.072	1.213
4.0	63.225	8.452	2.529	.338	14.0	65.791	8.795	9.211	1.231
.2	63.278	8.459	2.658	.355	.2	65.844	8.802	9.350	1.250
.4	63.323	8.465	2.786	.372	.4	65.896	8.809	9.489	1.268
.6	63.375	8.472	2.915	.390	.6	65.948	8.816	9.628	1.287
.8	63.427	8.479	3.044	.407	.8	66.001	8.823	9.768	1.306
5.0	63.472	8.485	3.174	.424	15.0	66.053	8.830	9.908	1.325
.2	63.525	8.492	3.303	.442	.2	66.105	8.837	10.048	1.343
.4	63.577	8.499	3.433	.459	.4	66.165	8.845	10.189	1.362
.6	63.622	8.505	3.563	.476	.6	66.218	8.852	10.330	1.381
.8	63.674	8.512	3.693	.494	.8	66.270	8.859	10.471	1.400
6.0	63.727	8.519	3.824	.511	16.0	66.322	8.866	10.612	1.419
.2	63.779	8.526	3.954	.529	.2	66.375	8.873	10.753	1.437
.4	63.834	8.532	4.085	.546	.4	66.434	8.881	10.895	1.456
.6	63.876	8.539	4.216	.564	.6	66.487	8.888	11.037	1.475
.8	63.929	8.546	4.347	.581	.8	66.539	8.895	11.179	1.494
7.0	63.973	8.552	4.478	.599	17.0	66.592	8.902	11.321	1.513
.2	64.026	8.559	4.610	.616	.2	66.644	8.909	11.463	1.532
.4	64.078	8.566	4.742	.634	.4	66.704	8.917	11.606	1.551
.6	64.130	8.573	4.874	.652	.6	66.756	8.924	11.749	1.571
.8	64.183	8.580	5.006	.669	.8	66.809	8.931	11.892	1.590
8.0	64.228	8.586	5.138	.687	18.0	66.868	8.939	12.036	1.609
.2	64.280	8.593	5.271	.705	.2	66.921	8.946	12.180	1.628
.4	64.332	8.600	5.403	.722	.4	66.973	8.953	12.323	1.647
.6	64.385	8.607	5.537	.740	.6	67.033	8.961	12.468	1.667
.8	64.437	8.614	5.670	.758	.8	67.085	8.968	12.612	1.686
9.0	64.482	8.620	5.803	.776	19.0	67.138	8.975	12.756	1.705
.2	64.534	8.627	5.938	.794	.2	67.198	8.983	12.902	1.725
.4	64.587	8.634	6.071	.812	.4	67.250	8.990	13.047	1.744
.6	64.639	8.641	6.205	.829	.6	67.302	8.997	13.191	1.763
.8	64.692	8.648	6.340	.848	.8	67.362	9.005	13.338	1.783

## **La Melaza como materia prima para la producción de alcohol:**

La melaza a diferencia de muchas otras materias primas para la producción de alcohol tales como el maíz y la papa, las cuales contienen carbohidratos como el almidón, que al ser pre-tratados con calentamiento y con acción enzimática, éste se hidroliza y se transforma en azúcares fermentables. Los carbohidratos en la melaza ya están en forma de azúcar, por lo que ésta no necesita un pre-tratamiento para ser fermentada.

Tipos de melazas:

Hay una lista de seis tipos básicos de melazas, las cuales pueden ser utilizadas como materia prima para fermentación. Ellas son:

- Melaza de caña de alta prueba.
- Melaza de caña.
- Melaza de caña refinada.
- Melaza de remolacha
- Melaza de remolacha refinada
- Melaza cítrica

Producción de Melaza de Caña:

En la producción de azúcar de caña, la caña es triturada en un molino para extraer el jugo, el cual es calentado, clarificado con la adición de cal y filtración (para remover las fibras de caña y lodos), luego se evapora para concentrar el azúcar y formar los cristales. El sirope que contiene los cristales es centrifugado para separar los cristales, y el residuo de sirope (el cual posee un alto contenido de azúcar) es después referido como miel A. Este es evaporado y nuevamente centrifugado, para obtener más cristales de azúcar, y el sirope que queda es ahora llamado miel B. Este proceso puede ser repetido nuevamente para obtener más rendimiento de azúcar y lo que resulta es la miel C.

Los molinos de azúcar normalmente practican un máximo de tres evaporaciones y centrifugaciones, pero el número de tratamientos dependerá de la economía del mercado. A la vez, cuando los precios del azúcar son muy altos, puede ser practicado un cuarto proceso, de tal forma que también se produce la miel D, la cual tiene mucha menor disponibilidad de cristales de azúcar. Por otro lado cuando los precios del azúcar son bajos, la miel A puede ser vendida directamente.

Con la repetida evaporación y centrifugación, el contenido de azúcar en la melaza disminuye, y la viscosidad, concentración de sales y otras impurezas incrementan, para terminar con un líquido espeso, viscoso y café, el cual es muy pesado en peso. El grado de concentración de las melazas es normalmente medido en grados Brix. La escala Brix es una medida del contenido de azúcar que un líquido posee, una vez disuelto, donde los sólidos suspendidos son azúcar. Expresado de otra manera, es el contenido de azúcar de una solución de azúcar con la misma gravedad específica que la de la muestra. Así, una melaza de 80° Brix tiene una gravedad específica de 1.416, la cual es la misma que la de una solución de azúcar que contiene el 80% en peso de azúcar. El Brix se mide con un hidrómetro, el cual fue originalmente utilizado únicamente para soluciones de azúcar.

## **Fermentación de la melaza para la producción de Etanol**

Dilución de las melazas:

La melaza de caña a 80° Brix no fermentará por sí sola, sin solución, ya que los azúcares y las sales ejercen una alta presión osmótica. Por consiguiente es necesario diluir la melaza por debajo de 25° Brix. Antes de llegar a este punto la levadura no comenzará a fermentar rápidamente, y la contaminación bacteriana puede desarrollarse antes de que la levadura haya tenido la oportunidad de estabilizarse, ya que la melaza es muy atacada por bacterias, algunas destilerías prefieren pasteurizar la melaza antes de la fermentación, pero es difícil justificar los costos involucrados, a menos que se incorpore como parte de una clarificación del proceso.

Cuando se considere la disolución de la melaza, se debe de recordar la medida de Brix que esta expresada en porcentaje en peso, así que todos los cálculos deben estar basados en peso y no en volumen.

En los Estados Unidos, el contenido típico de azúcar en las melazas (46%) es relativamente bajo, así que cuando la melaza es diluida a 25° Brix, el contenido de azúcar es solamente cerca del 14.3%, esto es suficiente solamente para dar del 7 – 8% v/v de etanol en el mosto fermentado. Las destilerías necesitan un contenido de etanol final más alto para economizar la energía que se genera durante la destilación, pero la fermentación no puede ser iniciada con un Brix mucho más alto sin correr el problema de comenzar bajo y con contaminación bacteriana. Algunas destilerías superan este problema diluyendo la primera porción de melaza llevándola al fermentador cerca de 18° Brix, Lo cual permite que la levadura se estabilice mucho más rápido. Luego revisan la lectura del Brix y agregan más melaza (la cual debe estar diluida a 35° Brix) cuando la lectura en el fermentador haya bajado hasta 12° Brix. Esto permite un logro de los niveles de etanol de alrededor de un 10%. Este procedimiento es el primer paso hacia lo que conocemos como incremento en la alimentación, el cual también es un paso hacia la fermentación continua. En el llenado del sistema de incremento en la alimentación, uno puede comenzar la fermentación a 14° Brix y estar alimentando más melaza a 35° Brix, para mantener la lectura del Brix en el fermentador entre 12 y 14° Brix, hasta que el tanque este lleno. Luego para ir a un proceso semi-continuo o continuo, es meramente necesario para evitar que los fermentadores se sobre llenen, introducir uno o más tanques.



## **Ilustración 2. Mezclador en Línea.**

### **Condiciones de fermentación**

Las fermentaciones de las melazas pueden ser llevadas de 90 – 95° F, pero si uno está apuntando para niveles altos de alcohol final en el mosto, es aconsejable que se mantengan el máximo de temperatura baja, ya que el efecto de la inhibición del alcohol sobre la levadura se incrementa a las más altas temperaturas.

Las fermentaciones de las melazas son generalmente mucho más rápidas que la fermentación de grano y puede completarse en la mitad de tiempo que se requiere para grano. Esto quiere decir que hay mucho más calentamiento siendo producido por hora, lo cual genera una mejor facilidad de enfriamiento que para grano. Algunas plantas de alcohol de grano colocan un intercambiador de calor externo entre dos fermentadores, pero esa práctica no es realmente factible con melazas, si uno está trabajando para maximizar eficiencia.



**Ilustración 3. Tanque fermentador.**

#### **Los Fundamentos de la Destilación de Alcohol:**

Considerando la importancia de la operación unitaria conocida como destilación, hay ciertos principios y fundamentos que son comunes en todo sistema de destilación. Los sistemas de destilación moderna son de múltiple efecto, continuo, contra corriente, sistema de contacto vapor-líquido que opera con las leyes físicas de estado de los diferentes materiales que hierven a diferentes temperaturas.

Un sistema de destilación debe contener los siguientes elementos:

- a. una alimentación compuesta de dos o más componentes para ser separados.
- b. Una fuente de energía para manejar el proceso (en la mayoría de los casos esta fuente de energía es vapor, entra directamente en la base de la columna o transfiriendo la energía a la columna que lo contiene a través de un intercambiador de calor indirecto llamado hervidor).
- c. Una cabeza, purificadora de producto consistiendo principalmente en la alimentación de los componentes con el más bajo punto de ebullición.
- d. Un producto de fondo que contenga los componentes de la alimentación procesando los más altos puntos de ebullición.
- e. Un condensador arriba, el cual normalmente contienen agua fría, para condensar el vapor que resulta de la ebullición creada por la entrada de energía. El líquido resultante de la condensación, es dividido en dos corrientes. Una de estos es el producto de las cabezas y el otro es el reflujo que retorna al tope de la columna para proporcionar la descarga de líquido en la porción superior de la columna.

La porción de la columna antes del punto de entrada de la alimentación se conoce como la sección de rectificación de la columna. La parte de la columna debajo del punto de entrada de la alimentación es denominada sección de agotamiento de la columna.

### **Análisis de Energía**

Además de la selección del dispositivo básico de contacto, los requerimientos energéticos deben estar establecidos. Esto se cumple con el análisis de equilibrio vapor-líquido.

### **Conservación de la energía**

El aumento de los costos de energía térmica, si provino de gas natural, aceite combustible carbón o biomasa, esta creando un énfasis aumentado en la recuperación de calor y una reducción en la energía térmica primaria usada. El fondo convencional para la alimentación de los intercambiadores de calor está siendo ahora complementado con la recuperación del calor del vapor latente en la parte de arriba por el precalentamiento del líquido de alimentación y otros líquidos del proceso intermedio. Las técnicas de destilación por múltiples etapas (similar al de múltiples efectos de evaporación) son también practicadas. Presión atmosférica, vacío atmosférico o presión al vacío son utilizadas en las fases de la columna, con la energía térmica pasando arriba desde una columna para proveer al hervidor calor para la próxima etapa. Tal que las dos etapas sean bastante comunes y que las tres etapas del sistema también hayan sido utilizadas. Además, la técnica moderna de recompresión de vapor, la cual es comúnmente usada en los sistemas de evaporación, está también siendo propuesta, y en algunos casos, aplicadas para sistemas de destilación. Tal sistema puede proveer por compresión del vapor de arriba una presión y temperatura conveniente para usarlo en el hervidor de la columna de agotamiento, sin embargo el grado de compresión requerida para el recubrimiento del tal calor puede consumir tan alta energía eléctrica como podría ser seguro en el suministro de energía.<sup>6</sup>



### **Ilustración 3. Cuerpo de una Columna de Destilación**

A continuación se presenta la tabla de propiedades del vapor saturado y agua saturada.

La porción de la columna antes del punto de entrada de la alimentación se conoce como la sección de rectificación de la columna. La parte de la columna debajo del punto de entrada de la alimentación es denominada sección de agotamiento de la columna.

### **Análisis de Energía**

Además de la selección del dispositivo básico de contacto, los requerimientos energéticos deben estar establecidos. Esto se cumple con el análisis de equilibrio vapor-líquido.

### **Conservación de la energía**

El aumento de los costos de energía térmica, si provino de gas natural, aceite combustible carbón o biomasa, esta creando un énfasis aumentado en la recuperación de calor y una reducción en la energía térmica primaria usada. El fondo convencional para la alimentación de los intercambiadores de calor está siendo ahora complementado con la recuperación del calor del vapor latente en la parte de arriba por el precalentamiento del líquido de alimentación y otros líquidos del proceso intermedio. Las técnicas de destilación por múltiples etapas (similar al de múltiples efectos de evaporación) son también practicadas. Presión atmosférica, vacío atmosférico o presión al vacío son utilizadas en las fases de la columna, con la energía térmica pasando arriba desde una columna para proveer al hervidor calor para la próxima etapa. Tal que las dos etapas sean bastante comunes y que las tres etapas del sistema también hayan sido utilizadas. Además, la técnica moderna de recompresión de vapor, la cual es comúnmente usada en los sistemas de evaporación, está también siendo propuesta, y en algunos casos, aplicadas para sistemas de destilación. Tal sistema puede proveer por compresión del vapor de arriba una presión y temperatura conveniente para usarlo en el hervidor de la columna de agotamiento, sin embargo el grado de compresión requerida para el recubrimiento del tal calor puede consumir tan alta energía eléctrica como podría ser seguro en el suministro de energía.<sup>6</sup>



### **Ilustración 3. Cuerpo de una Columna de Destilación**

A continuación se presenta la tabla de propiedades del vapor saturado y agua saturada.

**Table 2**  
**Properties of saturated steam and saturated water (pressure)**

Press. psia	Temp F	Volume, ft <sup>3</sup> /lb			Enthalpy, Btu/lb			Entropy, Btu/lb x F			Energy, Btu/lb		Press. psia
		Water	Evap	Steam	Water	Evap	Steam	Water	Evap	Steam	Water	Steam	
		$v_f$	$v_{fg}$	$v_g$	$h_f$	$h_{fg}$	$h_g$	$s_f$	$s_{fg}$	$s_g$	$u_f$	$u_g$	
0.0886	32.018	0.01602	3302.4	3302.4	0.00	1075.5	1075.5	0	2.1872	2.1872	0	1021.3	0.0886
0.10	35.023	0.01602	2945.5	2945.5	3.03	1073.8	1076.8	0.0061	2.1705	2.1766	3.03	1022.3	0.10
0.15	45.453	0.01602	2004.7	2004.7	13.50	1067.9	1081.4	0.0271	2.1140	2.1411	13.50	1025.7	0.15
0.20	53.160	0.01603	1526.3	1526.3	21.22	1063.5	1084.7	0.0422	2.0738	2.1160	21.22	1028.3	0.20
0.30	64.484	0.01604	1039.7	1039.7	32.54	1057.1	1089.7	0.0641	2.0168	2.0809	32.54	1032.0	0.30
0.40	72.869	0.01606	792.0	792.1	40.92	1052.4	1093.3	0.0799	1.9762	2.0562	40.92	1034.7	0.40
0.5	79.586	0.01607	641.5	641.5	47.62	1048.6	1096.3	0.0925	1.9446	2.0370	47.62	1036.9	0.5
0.6	85.218	0.01609	540.0	540.1	53.25	1045.5	1098.7	0.1028	1.9186	2.0215	53.24	1038.7	0.6
0.7	90.09	0.01610	466.93	466.94	58.10	1042.7	1100.8	0.3	1.8966	2.0083	58.10	1040.3	0.7
0.8	94.38	0.01611	411.67	411.69	62.39	1040.3	1102.6	0.1117	1.8775	1.9970	62.39	1041.7	0.8
0.9	98.24	0.01612	368.41	368.43	66.24	1038.1	1104.3	0.1264	1.8606	1.9870	66.24	1042.9	0.9
1.0	101.74	0.01614	333.59	333.60	69.73	1036.1	1105.8	0.1326	1.8455	1.9781	69.73	1044.1	1.0
2.0	126.07	0.01623	173.74	173.76	94.03	1022.1	1116.2	0.1750	1.7450	1.9200	94.03	1051.8	2.0
3.0	141.47	0.01630	118.71	118.73	109.42	1013.2	1122.6	0.2009	1.6854	1.8864	109.41	1056.7	3.0
4.0	152.96	0.01636	90.63	90.64	120.92	1006.4	1127.3	0.2199	1.6428	1.8626	120.90	1060.2	4.0
5.0	162.24	0.01641	73.515	73.53	130.20	1000.9	1131.1	0.2349	1.6094	1.8443	130.18	1063.1	5.0
6.0	170.05	0.01645	61.967	61.98	138.03	996.2	1134.2	0.2474	1.5820	1.8294	138.01	1065.4	6.0
7.0	176.84	0.01649	53.634	53.65	144.83	992.1	1136.9	0.2581	1.5587	1.8168	144.81	1067.4	7.0
8.0	182.86	0.01653	47.328	47.35	150.87	988.5	1139.3	0.2676	1.5384	1.8060	150.84	1069.2	8.0
9.0	188.27	0.01656	42.385	42.40	156.30	985.1	1141.4	0.2760	1.5204	1.7964	156.28	1070.8	9.0
10	193.21	0.01659	38.404	38.42	161.26	982.1	1143.3	0.2836	1.5043	1.7879	161.23	1072.3	10
14.696	212.00	0.01672	26.782	26.80	180.17	970.3	1150.5	0.3121	1.4447	1.7568	180.12	1077.6	14.696
15	213.03	0.01673	26.274	26.29	181.21	969.7	1150.9	0.3137	1.4415	1.7552	181.16	1077.9	15
20	227.96	0.01683	20.070	20.087	196.27	960.1	1156.3	0.3358	1.3962	1.7320	196.21	1082.0	20
30	250.34	0.01701	13.7266	13.744	218.9	945.2	1164.1	0.3682	1.3313	1.6995	218.8	1087.9	30
40	267.25	0.01715	10.4794	10.497	236.1	933.6	1169.8	0.3921	1.2844	1.6765	236.0	1092.1	40
50	281.02	0.01727	8.4967	8.514	250.2	923.9	1174.1	0.4112	1.2474	1.6586	250.1	1095.3	50
60	292.71	0.01738	7.1562	7.174	262.2	915.4	1177.6	0.4273	1.2167	1.6440	262.0	1098.0	60
70	302.93	0.01748	6.1875	6.205	272.7	907.8	1180.6	0.4411	1.1905	1.6316	272.5	1100.2	70
80	312.04	0.01757	5.4536	5.471	282.1	900.9	1183.1	0.4534	1.1675	1.6208	281.9	1102.1	80
90	320.28	0.01766	4.8777	4.895	290.7	894.6	1185.3	0.4643	1.1470	1.6113	290.4	1103.7	90
100	327.82	0.01774	4.4133	4.431	298.5	888.6	1187.2	0.4743	1.1284	1.6027	298.2	1105.2	100
120	341.27	0.01789	3.7097	3.728	312.6	877.8	1190.4	0.4919	1.0960	1.5879	312.2	1107.6	120
140	353.04	0.01803	3.2010	3.219	325.0	868.0	1193.0	0.5071	1.0681	1.5752	324.5	1109.6	140
160	363.55	0.01815	2.8155	2.834	336.1	859.0	1195.1	0.5206	1.0435	1.5641	335.5	1111.2	160
180	373.08	0.01827	2.5129	2.531	346.2	850.7	1196.9	0.5328	1.0215	1.5543	345.6	1112.5	180
200	381.80	0.01839	2.2689	2.287	355.5	842.8	1198.3	0.5438	1.0016	1.5454	354.8	1113.7	200
250	400.97	0.01865	1.8245	1.8432	376.1	825.0	1201.1	0.5679	0.9585	1.5264	375.3	1115.8	250
300	417.35	0.01889	1.5238	1.5427	394.0	808.9	1202.9	0.5882	0.9223	1.5105	392.9	1117.2	300
350	431.73	0.01913	1.3064	1.3255	409.8	794.2	1204.0	0.6059	0.8909	1.4968	408.6	1118.1	350
400	444.60	0.0193	1.14162	1.1610	424.2	780.4	1204.6	0.6217	0.8630	1.4847	422.7	1118.7	400
450	456.28	0.0195	1.01224	1.0318	437.3	767.5	1204.8	0.6360	0.8378	1.4738	435.7	1118.9	450
500	467.01	0.0198	0.90787	0.9276	449.5	755.1	1204.7	0.6490	0.8148	1.4639	447.7	1118.8	500
550	476.94	0.0199	0.82183	0.8418	460.9	743.3	1204.3	0.6611	0.7936	1.4547	458.9	1118.6	550
600	486.20	0.0201	0.74962	0.7698	471.7	732.0	1203.7	0.6723	0.7738	1.4461	469.5	1118.2	600
700	503.08	0.0205	0.63505	0.6556	491.6	710.2	1201.8	0.6928	0.7377	1.4304	488.9	1116.9	700
800	518.21	0.0209	0.54809	0.5690	509.8	689.6	1199.4	0.7111	0.7051	1.4163	506.7	1115.2	800
900	531.95	0.0212	0.47968	0.5009	526.7	669.7	1196.4	0.7279	0.6753	1.4032	523.2	1113.0	900
1000	544.58	0.0216	0.42436	0.4460	542.6	650.4	1192.9	0.7434	0.6476	1.3910	538.6	1110.4	1000
1100	556.28	0.0220	0.37863	0.4006	557.5	631.5	1189.1	0.7578	0.6216	1.3794	553.1	1107.5	1100
1200	567.19	0.0223	0.34013	0.3625	571.9	613.0	1184.8	0.7714	0.5969	1.3683	566.9	1104.3	1200
1300	577.42	0.0227	0.30722	0.3299	585.6	594.6	1180.2	0.7843	0.5733	1.3577	580.1	1100.9	1300
1400	587.07	0.0231	0.27871	0.3018	598.8	576.5	1175.3	0.7966	0.5507	1.3474	592.9	1097.1	1400
1500	596.20	0.0235	0.25372	0.2772	611.7	558.4	1170.1	0.8085	0.5288	1.3373	605.2	1093.1	1500
2000	635.80	0.0257	0.16266	0.1883	672.1	466.2	1138.3	0.8625	0.4256	1.2881	662.6	1068.6	2000
2500	668.11	0.0286	0.10209	0.1307	731.7	361.6	1093.3	0.9139	0.3206	1.2345	718.5	1032.9	2500
3000	695.33	0.0343	0.05073	0.0850	801.8	218.4	1020.3	0.9728	0.1891	1.1619	782.8	973.1	3000
3208.2	705.47	0.0508	0	0.0508	906.0	0	906.0	1.0612	0	1.0612	875.9	875.9	3208

## METODOLOGÍA

El presente estudio se realizó en Compañía Licorera de Nicaragua S. A., en el periodo Febrero – Junio 2005.

El Estudio da inicio definiendo las bases de cálculos necesarias para realizar los balances de materia en las etapas de mezclado en línea, prefermentación, fermentación y destilación y los balances de energía en las etapas de fermentación y destilación. Para dicha definición se utilizó el fundamento de la ley de la conservación de la materia y la energía.

Para la realización de los balances de materia se establecieron cuales eran los flujos de entrada y salida, las fracciones parciales de composición de los flujos así como los valores en cada fracción de las corrientes en las etapas de mezclado en línea, prefermentación, fermentación y destilación.

En la etapa mezclado en línea, para la realización de los balances de materia se consideraron los flujos de masa y las fracciones parciales de composición siguientes: una corriente de entrada de miel a 88 grados Brix y una de agua cien por ciento agua y una corriente de salida de mosto a 24 grados Brix, la información de los grados Brix que conforman estos flujos se obtuvieron del laboratorio de control de calidad de la empresa.

En la operación de prefermentación, los flujos de masa y la composición de los mismos para el balance de materia fueron: una corriente de entrada de mosto a 24 grados Brix, una corriente de entrada de la levadura previamente preparada en el laboratorio a 13.5 grados Brix dejándose en reposo hasta alcanzar nuevamente trece punto cinco grados Brix, conformando la corriente de salida del prefermentador.

El procedimiento práctico para el cálculo de los flujos de masa en esta etapa consistió en la aplicación de las siguientes fórmulas:

Primero se calculó la cantidad de mosto que sale del mezclador en línea y que entra al pre-fermentador:

$M_{24^{\circ}B} = \text{pulg.de Mosto en cada prefermentador} \times \text{los litros que hay por cada pulgada} \times \text{la densidad del mosto} \times \text{el N}^{\circ} \text{ de prefermentadores operando por día} \times \text{un día que tiene 24 horas} = \text{a la cantidad de mosto de } 24^{\circ} \text{ Brix en Kg./h en el proceso de prefermentación.}$

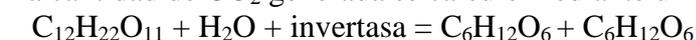
Teniendo el mosto de 24° Brix, se realizó un balance parcial por °Brix para encontrar la cantidad requerida de miel a 88°Brix y la cantidad de agua de dilución en el mezclador.

$\text{Miel}_{88^{\circ}B} = \text{Mosto } (24^{\circ} \text{ Brix}) / 88^{\circ} \text{ Brix.}$

La cantidad de agua se calculó por diferencia:

$\text{Agua} = \text{mosto } 24^{\circ} \text{ Brix} - \text{Miel } 88^{\circ} \text{ Brix}$

La cantidad de CO<sub>2</sub> generada se calculó mediante un balance estequiométrico.



*Azúcar invertido*      *Alcohol etílico*      *Dioxido de Carbono*