



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA**  
Departamento de Biotecnología y Ciencias Alimentarias

---

---

---

**DISEÑO DE UN EVAPORADOR PARA LA  
DESTILACIÓN DE BACANORA**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**Ingeniero Biotecnólogo**

PRESENTA

**David José Mendoza Aguayo**

CD. OBREGÓN, SONORA

Julio del 2006

---

## ÍNDICE

Lista de tablas.....	i
Lista de figuras.....	ii
Lista del apéndice.....	iii
Resumen.....	iv
I INTRODUCCIÓN.	
1.1. Justificación.....	2
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. Hipótesis.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.	
2.1. Bacanora.....	4
2.1.1. Tipos de bacanora.....	6
2.1.2. Antecedentes.....	7
2.1.3. Principales problemas/demandas de la cadena de agave bacanora.....	8
2.1.4. Cadena productiva potencial.....	9
2.1.5. La cadena industrial: Fabricación de bacanora.....	11
2.2. Levaduras.....	13
2.2.1. Ambiente.....	13
2.3. Destilación.....	15
2.3.1. Base teórica.....	16
2.3.2. Alambique u evaporador.....	17
2.3.2.1. Factores a considerar en el diseño del evaporador..	17
2.3.2.2. Quemador.....	24
III. MATERIALES Y MÉTODOS	
3.1. Materiales.....	28
3.1.1. Reactivos.....	28
3.1.2. Equipo.....	29
3.2. Metodología.....	30
3.2.1. Dimensiones del evaporador.....	30
3.2.2. Poder calórico del quemador.....	31
3.2.3. Características fisicoquímicas del mosto.....	33
Grados Gay Lussac.....	34

Densidad del mosto.....	36
Capacidad calorífica del mosto.....	36
Calor de ebullición de la mezcla binaria.....	37
3.2.4. Temperatura de evaporación del etanol.....	38
3.2.5. Tiempo de ebullición en el mosto fermentado.....	38
3.2.6. Porcentaje de etanol en el destilado.....	39
3.2.7. Cantidad de destilado a una eficiencia del 100%.....	39
3.2.8. Cantidad de gas Lp gastados.....	41
3.2.9. Cantidad de leña gastados.....	42
3.2.10. Cantidad real del destilado.....	43
3.2.11. Porcentaje de alcohol en el mosto residual real.....	43
3.2.12. Temperatura de ebullición del etanol en el mosto residual real.....	44
3.2.13. Características térmicas del mosto residual real.....	44
Capacidad calorífica del mosto residual real.....	44
Calor de ebullición en el mosto residual real.....	44
3.2.14. Tiempo total de destilación.....	45
3.2.15. Cantidad total de gas Lp empleado en la destilación.....	45
3.2.16. Cantidad total de leña empleado en la destilación.....	46

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1. Resultados.....	47
4.1.1. Dimensiones del evaporador.....	47
4.1.2. Poder calorífico del quemador.....	48
4.1.3. Grados Gay Lussac del mosto fermentado.....	49
4.1.4. Densidad del mosto fermentado.....	50
4.1.5. Peso en masa del mosto fermentado.....	50
4.1.6. Capacidad calorífica del mosto fermentado.....	50
4.1.7. Temperatura de evaporación del etanol en el mosto fermentado.....	51
4.1.8. Calor de ebullición del mosto fermentado.....	51
4.1.9. Tiempos de ebullición del etanol en el mosto fermentado.....	51
4.1.10. Porcentaje de alcohol en el destilado del mosto fermentado.....	51
4.1.11. Cantidad de destilado obtenido considerando una eficiencia del 100%.....	52
4.1.12. Cantidad de gas Lp gastado para evaporar las primeras gotas de etanol en el mosto fermentado.....	53
4.1.13. Cantidad de leña gastada para evaporar las primeras gotas de etanol en el mosto fermentado.....	53
4.1.14. Cantidad real de destilado.....	53
4.1.15. Porcentaje de alcohol en el mosto residual real.....	54
4.1.16. Temperatura de ebullición del etanol en el mosto residual real.....	54
4.1.17. Características térmicas del mosto residual real.....	54
4.1.18. Tiempo total de la destilación.....	55

---

4.1.19. Cantidad total de gas Lp empleado en la destilación.....	55
4.1.20. Cantidad total de leña empleada en la destilación.....	56
4.2. Discusión de resultados.....	56
V CONCLUSIONES.....	62
LITERATURA CITADA.....	64

## LISTA DE TABLAS

NÚMERO	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
1	Parámetros fisicoquímicos del bacanora (NOM-168-SCFI-2004).	5
2	Comparación entre las diferentes formas de elaboración de bacanora.	12
3	Datos de las especies de levaduras más empleadas en la fermentación.	14
4	Composición química del producto final en la destilación de muestras para la producción de aguardiente, en evaporadores de cobre y acero inoxidable.	19
5	Valor de las capacidades caloríficas del agua y del etanol que serán utilizadas como constantes dentro del diseño del evaporador.	37
6	Resultados de las pruebas realizadas al quemador para calcular su poder calórico.	48
7	Resultados del poder calórico del quemador una vez sustituidos los datos en la ecuación (3).	48
8	Comportamiento del evaporador según las características fisicoquímicas del mosto fermentado dentro del proceso de destilación, suponiendo una efectividad del 100%.	58
9	Representación del comportamiento del mosto residual real según sus características fisicoquímicas, dentro de un destilador con una eficiencia del 70%.	59
10	Representación del comportamiento real del destilador a una eficiencia del 70%.	61

**LISTA DE FIGURAS**

<b>NÚMERO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PÁGINA</b>
1	Sonora: región con potencial para el cultivo de Agave vivípara.	8
2	Relación de equilibrio líquido-vapor en una muestra binaria.	17
3	Quemador atmosférico de uso doméstico.	25
4	Inyector calibrado.	26
5	Diferentes tipos de cámaras de mezcla gas-aire.	27
6	Proceso de mezcla gas-aire dentro de la cámara.	27
7	Quemador utilizado para el diseño del evaporador.	32
8	Representación del balance general de materia de un proceso de destilación intermitente.	40

**LISTA DEL APÉNDICE**

<b>NÚMERO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PÁGINA</b>
1	Tabla de conversión de unidades.	69-72
2	Tabla de densidades según el contenido de grados Gay Lussac de las mezclas Etanol – Agua.	73
3	Poder Calórico del Gas Lp, según las concentraciones comerciales de propano y butano.	74
4	Composición porcentual de la leña y su poder calórico según concentración de humedad.	75

## RESUMEN

El objetivo del presente estudio es proyectar una solución real y rentable de la implementación de tecnología en el proceso de destilación del bacanora. Para lograr esto fue necesario determinar las cualidades fisicoquímicas del mosto fermentado, las cuales fueron los grados Gay Lussac (G.L.), densidad del mosto, y peso en masa del mosto. A través de ellas, se pudo determinar las cualidades térmicas del mismo mosto fermentado: capacidad calorífica, calor de ebullición y temperatura de ebullición.

La capacidad volumétrica del evaporador se dedujo según las necesidades de los vinateros. Estos manifiestan que sus capacidades de producción oscilan alrededor de los 200 litros, y considerando los principios de la transmisión de calor se llegó a dimensionar un evaporador geométricamente adecuado de alrededor de 250 lts, de capacidad con unas dimensiones de 1.38 m de altura y un diámetro de 48 cm.

En el caso del gas Lp como fuente de energía, se empleó el funcionamiento de un quemador comercial, del cual fué necesario inducir una serie de experimentos enfocados a estudiar su capacidad calórica y de esta manera deducir una serie de comportamientos dentro del evaporador. Además fue necesario estudiar el comportamiento y la presencia de los grados Gay Lussac (G.L.), dentro del mosto fermentado, ya que de este aspecto fisicoquímico dependió el comportamiento completo del sistema de evaporación del mosto fermentado, para así obtener el producto deseado.

Los resultados del presente estudio arrojaron una serie de ecuaciones matemáticas, que reflejan el comportamiento que se llevará a cabo en el sistema, prediciendo el comportamiento del proceso de destilación. En cuanto a los grados G.L. se prevé un resultado de 34° con un volumen de 19.97 lts de producto, y una necesidad de calor que debe aplicarse al proceso según el tipo de fuente de

energía. Para el gas Lp resultó de 1.10 Kg. y para la leña de encino de 2.81 Kg. Al igual se calcularon los tiempos en los cuales se dividirá la cabeza del cuerpo, encontrando un tiempo 3.10 hrs. y 9.96 min respectivamente, siendo estos resultados adaptados a un volumen de 200 lts de mosto fermentado.

Cabe señalar que estos resultados se pueden ajustar a condiciones reales, puesto que los datos obtenidos son a nivel experimental en escala piloto, pero pueden ser adecuados a la realidad por medio de las ecuaciones que se presentan en este trabajo.

## I. INTRODUCCIÓN

El Bacanora se constituye como parte de la tradición sonorenses, en el sentido de que este mezcal es típico de un agave o maguey que se reproduce en el clima y topografía de Sonora. Este licor es mencionado por los primeros colonizadores que llegaron al estado, como una bebida que los indígenas habituaban en sus celebraciones. Por lo tanto, este licor es rural puesto que su materia prima se da en los cerros y arroyos de la sierra sonorenses.

En épocas anteriores a 1992, los productores comúnmente conocidos como vinateros, eran personajes que se ganaban la vida destilando el bacanora clandestinamente. Pero a partir de esta fecha, la elaboración del bacanora se legalizó y ésta se convirtió en una actividad perfectamente legal desde su destilación, envasado y comercialización, conservando al mismo tiempo su autenticidad (Núñez, 2002).

La infraestructura para procesar este mezcal sonorenses es rudimentaria, pues consiste en primero hacer un horno en la tierra donde se depositan los corazones de maguey para su cocción, terminando con la destilación del jugo extraído del maguey. Estos procedimientos carecen de sistemas de control, sanidad y sobre todo de efectividad, ya que es la experiencia del vinatero en la que recaen todos estos aspectos de la producción.

Lo anterior refleja la impetuosa necesidad de adquirir nuevas técnicas y tecnologías para el mayor aprovechamiento de los recursos en la producción del aguardiente, y así poder llevar la actividad económica a niveles más altos como lo es el mercado local, nacional y por que no internacional. Esto hará del bacanora un producto oriundo de Sonora como el Tequila es de Jalisco y así representar la valía del pueblo mexicano en cuanto a calidad en sus productos de exportación (Núñez, 2002).

### **1.1 Justificación:**

En la actualidad, la región serrana de Sonora registra altos niveles de pobreza y marginación y es quizá una de las más afectadas por la crisis ganadera, la sequía y la sobreexplotación de recursos. En la búsqueda de alternativas económicas para esta zona, destaca con gran potencial de desarrollo la elaboración de bacanora que constituye una de las prácticas económicas y culturales de más arraigo en la región. En ese sentido, el propósito general del estudio es el de impulsar la economía del bacanora en la zona serrana, a partir de métodos más avanzados que induzcan el aprovechamiento de las oportunidades que proveen las demandas nacional e internacional de licores elaborados a partir de agave. El diseño del evaporador propuesto en este trabajo impactara en el desarrollo arriba mencionado.

### **1.2 Objetivos**

#### **1.2.1 Objetivo general.**

Diseño de un evaporador para la destilación de bacanora o cualquier otra bebida de alta graduación alcohólica.

#### **1.2.2 Objetivos específicos.**

- Ajustar el volumen y las especificaciones geométricas del evaporador resultante según las necesidades de los productores.
- Establecer las cualidades fisicoquímicas de los mostos fermentados.
- Considerar los factores y capacidades termodinámicas dentro del proceso de evaporación del mosto fermentado.
- Implementar un sistema sencillo en el cual el operador del evaporador pueda simplificar su trabajo.

**1.3 Hipótesis:**

El conocimiento de las cualidades fisicoquímicas y térmicas del mosto fermentado, facilitará el diseño y operación de un evaporador mediante un sistema que nos permita controlar su funcionamiento reduciendo costos, tiempos y aumentar la calidad del producto.

## II REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1.- BACANORA

Es una bebida alcohólica regional del estado de Sonora, México, obtenida por destilación y rectificación del saite, preparado originalmente con los azúcares extraídos por molienda de las cabezas maduras de *Agave vivipara*, antes *Agave angustifolia*, previamente cocidos, que son sometidos a fermentación alcohólica utilizando levaduras. El bacanora es un líquido que, de acuerdo con su tipo es incoloro o del tinte amarillento cuando es madurado en recipientes de madera de roble o encino, o cuando se aboca aún sin maduración.

Esta definición se apoya en las características fisicoquímicas empleadas para su producción y comercialización a nivel nacional, estos aspectos antes mencionados son regularizados por la norma (NOM-168-SCFI-2004) provista en la tabla 1 (Núñez, 2002).

**Tabla 1** Parámetros Físicoquímicos del Bacanora (NOM-168-SCFI-2004).

Parámetros	Especificaciones		Método de prueba
	mínimas	máximas	
Contenido Alcohólico a 293 K (20°C) (% Alc. Vol.)	38	55	NOM-142-SSA1 o NMX-V-013-NORMEX
Extracto Seco g/l	0.2	11	NMX-V-017-NORMEX
Acidez Total (como ácido acético) (mg/100ml de alcohol anhidro)	0	170	NMX-V-016-S
Metanol (mg/100ml de alcohol anhidro)	30	300	NOM-142-SSA1 o NMX-V-021-S
Alcoholes superiores (mg/100 ml de alcohol anhidro)	100	400	NOM-142-SSA1 o NMX-V-014-S
Aldehídos (mg/100 ml de alcohol anhidro)	---	40	NOM-142-SSA1 o NMX-V-005-S
Furfural (mg/100 ml de alcohol anhidro)	---	4	NOM-142-SSA1 o NMX-V-004-S
Esteres (acetato de étilo)	2	200 (250 si es reposado o añejo)	NMX-142-SSA1
<b>Límite Máximo</b>			
Cobre (Cu) (mg/l)	2		NOM-142-SSA1
Plomo (Pb) (mg/l)	0,5		NOM-142-SSA1
Arsénico (As) ( mg/l)	0,5		NOM-142-SSA1
Zinc (Zn) (mg/l)	1,5		NOM-142-SSA1

Fuente: \*Núñez, 2002 Pág. 231

### **2.1.1.- Tipos de Bacanora**

#### **Bacanora blanco.**

Producto cuya graduación alcohólica según la NOM-168-SCFI-2004 comercial debe, en su caso, ajustarse con agua de dilución (Núñez, 2002).

#### **Bacanora joven.**

Producto susceptible de ser abocado, cuya graduación alcohólica comercial debe, en su caso, ajustarse con agua de dilución. El resultado de las mezclas de bacanora blanco con bacanora reposado y/o añejo se considera como bacanora joven u oro (Núñez, 2002).

#### **Bacanora reposada.**

Producto susceptible a ser abocado, que se deja por lo menos dos meses en recipientes de madera de roble o encino, cuya graduación alcohólica comercial debe, a su caso, ajustarse con agua desmineralizada, potable o destilada. Mezcla de diferentes bacanoras reposados, la edad para el bacanora resultante es el promedio ponderado de las edades y volúmenes de sus componentes (Núñez, 2002).

#### **Bacanora añejo.**

Producto susceptible a ser abocado, sujeto a un proceso de maduración de por lo menos un año en recipientes de madera de roble o encino, cuya capacidad máxima sea de 200 litros, y con una graduación alcohólica comercial que debe, en su caso, ajustarse con agua. En mezclas de diferentes bacanoras añejos, la edad para el bacanora resultante es el promedio ponderado de las edades y volúmenes de sus componentes (Núñez, 2002).

### 2.1.2.- Antecedentes

El agave (del griego agauos, que significa “admirable” o “noble”) se a utilizado históricamente como fuente de alimentación, bebidas y fibra por las diferentes tribus indígenas del suroeste de Estados Unidos y todo México (Núñez, 2002).

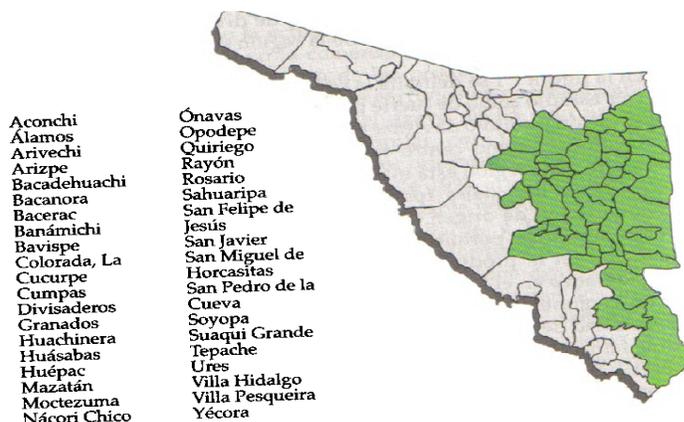
Según Núñez, 2002, se define al bacanora como uno de los mezcales mas famosos de México, el cual toma su nombre de la localidad de donde se produce (Bacanora, Sonora). La especie principal empleada en su producción es *Agave vivipara*, antes conocida como *Agave angustifolia haw* e inicialmente llamada *Agave pacifica trel*.

El agave de donde se obtiene el bacanora crece en la mayor parte de la región serrana de Sonora. Considerando los lugares en los cuales se propaga de manera natural, así como aquellos en los que existe la tradición y la cultura de producción de la bebida, se elaboró una denominación de origen que incluye 35 municipios (ver figura 1), para proteger una región reconocida como productora de bacanora dentro de la entidad. Un estudio hecho a finales de los 70's argumentaba que su producción fué sustentable por que los recursos no se sobre explotaron (Núñez, 2002).

Actualmente no existe información disponible con respecto a la población de los agaves silvestres, sin embargo en un estudio sobre el tema los argumentos de algunos vinateros son en el sentido de que tienen que caminar muy lejos para obtener la planta, lo cual es un indicador de alguna degradación debido a su sobreexplotación.

Como resultado de las nuevas regulaciones sobre producción y distribución de bacanora, el conocimiento de las prácticas correctas de cultivo para evitar la extinción del recurso agave, la adecuación de la planta y los estudios orientados a incrementar los rendimientos que permitan al bacanora acceder a mercados tan importantes como los del tequila, se reflejarían en un mayor arraigo de la

población serrana, aumento en los ingresos, más y mejores empleos, así como una forma de diversificar las actividades económicas de la región serrana del estado (Núñez. 2002).



**Figura 1.-** Sonora: región con potencial para el cultivo de *Agave vivipara*  
Fuente: (Núñez, 2002)

### 2.1.3.- Principales problemas y demandas de la cadena agave Bacanora.

Los principales rezagos a los que se enfrenta la población sierreña en la producción de bacanora, se resumen en:

- La inexistencia de una real cadena productiva del bacanora, en el sentido de que ésta incluya y asocie a una serie de actores sociales dedicados a producir y distribuir el producto final, con sus insumos y materias primas, y con los ambientes organizacionales e institucionales que apoyen esta actividad (gobierno, organizaciones no gubernamentales, políticas, programas, etc.).

- La débil organización y vinculación que existe entre los agentes y actores que integran los diferentes sectores de la cadena productiva (productores de agave, destiladores, comercializadores). Esto dificulta la ejecución de iniciativas estratégicas lo que deprime la producción y provoca la venta de persona a persona sin identificación del producto y productor, debido principalmente a las exigencias físicas que afectan la producción y venta de este tipo de bebidas. (Núñez, 2002).
- El alto costo financiero deja fuera de oportunidad a la mayoría de las inversiones productivas, particularmente de escala modesta y, como es el caso, de largo plazo de maduración de la materia prima y que actualmente ya está escasa. Además no hay plan definido para reforestación intensa tal como se requiere para que la industria sea sustentable.

Por otra parte, no existe un sector de proveedores de insumos, ni maquinaria y equipo en las diferentes etapas del proceso productivo como hornos, alambiques, llenados y envases de la bebida. Por ejemplo, la mayoría de los vinateros de la sierra utilizan cualquier recipiente de plástico para el envasado de su producto y se vende de persona a persona, por las mismas características rudimentarias que reviste el proceso y la escala tan reducida con que se realiza (Núñez, 2002).

#### **2.1.4.- Cadena productiva potencial.**

Según Núñez Noriega 2002, las condiciones para la producción de bacanora son cada vez más factibles, Gracias al estudio realizado por el mismo, las condiciones para que un proyecto productivo de esta índole pueda llevarse a cabo se basan en planes estratégicos a largo plazo los cuales se desglosan en los siguientes puntos:

- De acuerdo con la capacidad de oferta de vástagos de agave, se prevé que potencialmente se puede alcanzar a plantar un total de 1, 500,000 plantas anuales. A razón de 2,500 plantas por hectárea, significaría que el cultivo de agave cubriría una superficie de 600 hectáreas aproximadamente.

- 
- En el supuesto de rendimientos promedio de 25 kilogramos de peso promedio de la piña de agave, se estima una producción anual de agave para ser procesado igual a 50,000 toneladas anuales (hacia el ciclo 2008-2009) (Núñez, 2002).
  - El volumen de producción de agave por hectárea alcanzaría entonces un monto de 62.5 toneladas. En cuanto al sector agavero en conjunto, sería igual a 37,500 toneladas por año. Debido a la conformación del terreno en la zona de origen dificulta el tener plantaciones extensas de producción masiva, que también tendría el problema de la distribución de las piñas para lugares lejanos al centro de producción.
  - Una producción de bebida de bacanora igual a 3, 750,000 litros es la que pudiera obtenerse anualmente, suponiendo sistemas de producción más eficientes o no tradicionales que permitan obtener un litro de bacanora al procesar 10 kilogramos de materia prima cuando mucho, ya que en la actualidad se usa una mayor cantidad de agave, lo que ha propiciado la casi desaparición del agave silvestre en gran parte del estado. De acuerdo a información del patronato del tequila se están utilizando de 7 a 8 Kg. de piña por litro de tequila, en la producción de bacanora esa misma relación es aplicada (Núñez, 2002).
  - El número de productores de agave que potencialmente se incorporarían por año a la actividad de producción de agave: 120 – 150
  - Promedio de cada productor 5 hectáreas (Núñez, 2002).
  - Volumen de producción de bacanora proyectado para el año 2009: 4.5 – 5.0 millones de litros. Jalisco produce alrededor de 200 millones de litros; Oaxaca, 10, pero Zacatecas tiene problemas de colocación del producto al fabricar solo 2 millones de litros de mezcal. Estos lugares no tienen una bebida bien conocida como es el caso del bacanora, el cual es más su fama que su producción (Núñez, 2002).

- 
- El volumen de producción significaría que el valor de la producción de la industria sería de alrededor de 500 millones de pesos (suponiendo un precio de venta del producto aproximado a 100 pesos el litro).

#### **2.1.5.- La cadena industrial: la fabricación del bacanora.**

La producción de bacanora en la región serrana de Sonora se caracteriza por su práctica eminentemente artesanal. Por eso es de vital importancia crear un análisis que se centre en las implicaciones de rendimiento y rentabilidad (costos / beneficio) de la fabricación de la bebida en función de las cuatro etapas implícitas en dicho proceso: cocimiento u horneado, molienda, fermentación y, por último, destilación quedando pendiente el envasado.

Así mismo es deseable mantener el enfoque de la premisa fundamental del rescate del bacanora y los procedimientos tradicionales con que se elabora. Con esto se tendría un enfoque más amplio en las ventajas de producir esta bebida en las condiciones técnicas modernas a comparación de las artesanales, como una alternativa susceptible de ser adoptada (Ver tabla 2) (Núñez, 2002).

**Tabla 2** Comparación entre las diferentes formas de elaboración de bacanora

<b>Tradicional / Artesanal</b>	<b>Moderna / Industrial</b>
Utilización de agave silvestre (A. Vivipara o A. Angustifolia).	Uso de agave cultivado (A. Vivipara o A. Angustifolia).
Cocción o “tatemada” de la piña de agave en hornos rudimentarios, subterráneos, cubiertos con laminas de metal y tierra.	Cocimiento en hornos de mampostería, uso de autoclaves, uso de gas en lugar de leña
Molienda o desfibración con mazos o palos de madera.	Maceración de maguey con desgarradora mecánica, Molino de martillos o rodillos.
Fermentación en barriles rudimentarios de metal u otros materiales, con capacidad de 200 litros y sin inóculo.	Fermentación en recipientes de acero inoxidable de mayor capacidad, uso de levaduras y acondicionadas.
Destilación en barriles metálicos, calentados con leña; se utilizan un “sombrero” y “serpentina” de cobre, muy rudimentario.	Destilación en alambiques de cobre o acero de mayor capacidad, con uso de gas, como fuente de energía.
La producción es muy limitada, destinándola al autoconsumo y la comercialización local.	Producción eminentemente comercial, envasada, etiquetada. Oficialmente autorizada
La bebida obtenida es de buena a alta calidad, presentándose altas variaciones en sus características organolépticas, en función del toque particular que cada productor le otorga.	La bebida es de alta calidad si variaciones en sus características organolépticas, con sabores menos complejos y ásperos pero de aroma mas amigable y homogéneo en concentración y calidad.
Los productores en su mayoría son vaqueros, ejidatarios y jornaleros que complementan sus ingresos con esta actividad, en vinatas generalmente ubicadas en puntos alejados de vías de comunicación y los centros de población.	Los productores son grupos con sede en las ciudades cercanas o en los poblados de mayor importancia, con acceso a las vías de comunicación, infraestructura urbana, a un ambiente organizacional y organizativo que puede apoyar la producción (financiamiento, por ejemplo).
El nivel de marginación de las áreas de producción es de los mas altos de sonora, pero medio con respecto al resto del país, según INEGI	Las áreas de producción son las mismas, De acuerdo con la denominación de origen.

Fuente: \* Núñez Noriega, 2002 Pág. 60

## 2.2.- LEVADURAS.

Las levaduras son hongos unicelulares y la mayoría son ascomicetos, normalmente son células ovales o cilíndricas y la división es habitualmente por gemación, durante el proceso de gemación, se origina una pequeña yema que aumenta de tamaño gradualmente y se separa de la célula madre, las levaduras normalmente no desarrollan micelio, sino que permanecen en estado unicelular durante todo el ciclo de crecimiento, sin embargo algunas pueden filantar. Así por ejemplo, la levadura *Candida albicans*, una levadura potencialmente patógena, necesita estar en su forma filamentosa o micelial para ser verdaderamente patógena, incluso la levadura de panadería *Saccharomyces cerevisiae*, es capaz de formar micelio bajo ciertas condiciones (Bourgeois, 1995).

### 2.2.1.- Ambiente.

La vasta mayoría de las levaduras son mesófilas, con una temperatura máxima de crecimiento entre 24 y 48°C. Sólo unas pocas (2%) son psicrófilas con una temperatura máxima de crecimiento por debajo de 24°C, pero mayor es el número de las levaduras que tienen la temperatura óptima de crecimiento por debajo de 20°C. No hay levaduras que puedan crecer a 50°C y solamente unas pocas se pueden desarrollar cerca de 0°C, entre las que se encuentran *Yarrowia lipolytica*, *Debaryomyces hansenii* y *Pichia membranaefaciens*. Por otra parte, *Kluyveromyces marxianus* crece a 48°C, mientras que otras de los molinos azucareros son capaces de proliferar por sobre los 40°C, entre ellas *Pichia polymorpha*, *Geotrichum capitatum*, *Saccharomyces cerevisiae* y especies de *Candida* y *Debaryomyces*. En general, la presencia de etanol o bicarbonato aumenta la temperatura mínima de crecimiento (Déak & Beuchat 1996).

Son pocas las levaduras que desarrollan en presencia de altas concentraciones de azúcar o sal. Alrededor de treinta especies se multiplican en el rango de actividad de agua entre 0,912 y 0,876, correspondientes a los géneros *Zygosaccharomyces*,

*Candida*, *Debaryomyces*, *Pichia*, *Schizosaccharomyces* y *Torulaspota*. En general las levaduras toleran mejor altas concentraciones de azúcar que de sal. Entre las que prefieren substratos salados se hallan *Geotrichum terrestre*, *Stephanoascus ciferrii*, *D. hansenii* y *Lipomyces kononekoeae*. Por otra parte *Zygosaccharomyces mellis* tolera mejor la glucosa que la sacarosa.

Los azúcares que actúan como nutrientes a concentraciones moderadamente bajas (0.5 a 2.0 % en peso/ volumen), e inhiben del (20 al 40% en peso/volumen). Es por eso que según el tipo de levadura, será la tolerancia a concentraciones mas elevadas de azucars, esto debido a que unas especies pueden hidrolizar hidratos de carbono mas complejos que otros, pero la basta mayoría de las levaduras son capaces de hidrolizar hexosas como la glucosa, entre los que se encuentran los del genero *Saccharomyces* y sus sinónimos. Las condiciones anteriores se reflejan en la tabla 3 (Déak & Beuchat 1996).

**Tabla 3.-** Datos de las especies de levadura mas empleadas en fermentaciones.

Levadura (Género y Especie)	Forma celular	Tamaño celular (3 días a 25°C en agar malta), μ	Reproducción en su etapa Vegetativa.	Fermentación						Asimilación				
				Glucosa	Galactosa	Sucrosa	Maltosa	Lactosa	Rafinosa	Glucosa	Galactosa	Sucrosa	Maltosa	Lactosa
Saccharomyces Cerevisiae	Redondas, ovaladas cortas.	(3-10) X (4.5-15)	FloreCIMIENTO multilateral	+	+ <sup>0-a</sup>	+	+	-	+ <sup>1/3</sup>	+	+ <sup>a</sup>	+	+	-
S. carlsbergensis	Redondas, ovaladas cortas.	(3.5-8) X (5- 15.5)	FloreCIMIENTO multilateral	+	+ <sup>a</sup>	+	+	-	+	+	+	+	+	-
S. mellis	Redondas a ovaladas	(2.5-5.3) X (2.5- 7)	FloreCIMIENTO multilateral	+	-	-	-	-		+	+ <sup>0</sup>	-	-	-

Fuente: \* Bourgeois C.M. (2002).

Código: <sup>a</sup> En ocasiones débil. <sup>b</sup> Muy débil.

### **2.3.- DESTILACIÓN.**

Proceso que consiste en calentar un líquido hasta que sus componentes más volátiles pasan a la fase de vapor y, a continuación, enfriar el vapor para recuperar dichos componentes en forma líquida por condensación. El objetivo principal de la destilación es separar una mezcla de varios componentes aprovechando sus distintas volatilidades, o bien separar los materiales volátiles de los no volátiles.

Sin embargo, la finalidad principal de la destilación es obtener el componente más volátil en forma pura. Por ejemplo, la eliminación del agua de la glicerina evaporando el agua, se llama evaporación, pero la eliminación del agua del alcohol evaporando el alcohol se llama destilación, aunque se usan mecanismos similares en ambos casos (Prawnitz y Poling, 2000).

Si los puntos de ebullición de los componentes de una mezcla sólo difieren ligeramente, no se puede conseguir la separación total en una destilación individual. Un ejemplo importante es la separación de agua, que hierve a 100 °C, y alcohol, que hierve a 78,5 °C. Si se hierve una mezcla de estos dos líquidos, el vapor que sale es más rico en alcohol y más pobre en agua que el líquido del que procede, pero no es alcohol puro.

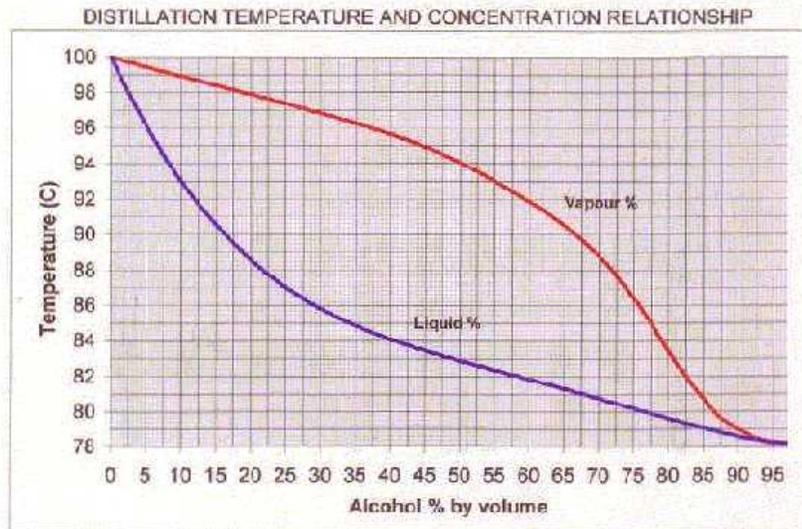
Con el fin de concentrar una disolución que contenga un 10% de alcohol (como la que puede obtenerse por fermentación) para conseguir una disolución que contenga un 50% de alcohol (como en el whisky), el destilado ha de volver a destilarse una o dos veces más, y si se desea alcohol industrial (95%) son necesarias varias destilaciones por rectificación o utilizar torres de rectificación para hacerlo en un solo paso, también el uso de 2 ó 3 alambiques en serie permiten alcanzar altas graduaciones en un solo paso (Prawnitz y Poling, 2000).

### 2.3.1. - Base teórica.

En la mezcla simple de dos líquidos solubles entre sí, la volatilidad de cada uno es perturbada por la presencia del otro. En este caso, el punto de ebullición de una mezcla al 50%, por ejemplo, estaría a mitad de camino entre los puntos de ebullición de las sustancias puras, y el grado de separación producido por una destilación individual dependería solamente de la presión de vapor, o volatilidad de los componentes separados a esa temperatura. Si un componente sólo es ligeramente soluble en el otro, su volatilidad aumenta anormalmente, en disoluciones de alcohol muy concentradas, la desviación es aún mayor: la destilación de alcohol de 99% produce un vapor de menos de 99% de alcohol. Por esta razón el alcohol no puede ser concentrado por destilación más de un 97%, aunque se realice un número infinito de destilaciones ([www.homedistillers.org](http://www.homedistillers.org)).

Utilizando la Figura N°2, donde se indica la relación del porcentaje de alcohol de una mezcla etanol y agua, frente a su temperatura de ebullición, se puede deducir la concentración de alcohol con la cual saldrá al momento de condensarla e incluso de una recirculación, aumentando así su porcentaje alcohólico ([www.homedistillers.org](http://www.homedistillers.org)).

Por ejemplo: una mezcla de alcohol y agua con un 10% de etanol el cual según la gráfica evaporará a la temperatura de 93°C, limitándonos a la línea azul, posteriormente deslizándose horizontalmente hacia la línea roja de vapor, lo cual indicara el porcentaje de etanol una vez que este sea condensado, obteniendo así una aproximación teórica del resultado obtenido después del proceso de destilación sobre el grado de etanol deseado ([www.homedistillers.org](http://www.homedistillers.org)).



**Figura 2.-** Relación de equilibrio de liquido-vapor en una mezcla binaria etanol-agua

Fuente: \* [www.homedistillers.org](http://www.homedistillers.org)

### 2.3.2.- Alambique o evaporador.

Un evaporador es un intercambiador de calor, de modo que mientras uno de ellos se enfría, disminuyendo su temperatura (suponiendo una fuente de energía de vapor húmedo), el otro se calienta (liquido a calentar) pasando, habitualmente, de su estado líquido original a estado vapor. Los evaporadores se fabrican en muy diversos tamaños y con distintas disposiciones, siendo profusamente empleados en gran cantidad de procesos térmicos (Mike Nixon and Mike McCaw, 2002).

#### 2.3.2.1.- Factores a considerar en el diseño del evaporador

##### Influencia del material del evaporador

---

Según estudios realizados por Ronaldo F. Nascimento del Instituto de Química de Sao Carlos, Brasil 1998, en muestras sometidas a análisis para demostrar la presencia de iones cobre en aguardientes oriundas de diversas regiones de Brasil, indicaron en algunos casos contaminación por encima de lo permitido por la legislación brasileña (5mg/L). Entretanto la mayoría de los aguardientes estudiados, indicaron la presencia de este material oscilando en torno a 4.70 mg/L casi al límite de lo permitido por la legislación brasileña.

El cobre es el material más utilizado en la fabricación de alambiques, pero también es utilizado en la industria como catalizador para la producción de acetaldehídos a partir de la deshidrogenación del etanol, operación mediante el cual ocurre la formación de carbonato básico de cobre en la superficie del metal. En el proceso de destilación de aguardiente sucede algo similar, ya que ocurre la formación de carbonato básico de cobre en la superficie del metal que es arrastrado por los vapores ácidos producidos durante la destilación que por arrastre conduce a la contaminación del producto final con iones de cobre, es por ello que la industria del aguardiente encuentra barreras fiscales por el exceso de cobre a nivel de mercado interno como el externo, ya que la legislación de algunos países no tolera más de 2 mg/L de cobre en las destilaciones alcohólicas, como lo es el caso de México (ver tabla 1).

La construcción de evaporadores (alambiques) de acero inoxidable en vez de cobre, representa una solución viable para este problema. Ronaldo 1998, realizó un estudio para poder evaluar el efecto de la destilación de caldo de caña fermentado en la composición química del producto final, en los diferentes materiales de evaporadores (cobre y acero inoxidable), tomándose en cuenta una similitud en la cantidad de caldo de caña fermentado, tiempo y condiciones experimentales en los diferentes evaporadores. Evaluando así la presencia de los principales compuestos secundarios (sabor y olor) como son aldehídos, cetonas, ácidos, alcoholes y esterres arrojando los siguientes resultados que se muestran en la tabla 4.

**Tabla 4.-**Composición química del producto final en la destilación de mostos para la producción de aguardientes, en evaporadores de cobre y acero inoxidable.

Compostos	Cobre <sup>a</sup>	Inox <sup>a</sup>
formaldeído	< LD	< LD
acetaldeído	19,0 ± 1,21	9,00 ± 0,05
n-butiraldeído	0,19 ± 0,02	0,16 ± 0,02
benzaldeído	0,63 ± 0,03	0,467 ± 0,01
valeraldeído	0,15 ± 0,03	0,198 ± 0,001
acetona	0,41 ± 0,11	0,468 ± 0,025
acetato de etila	16,3 ± 0,12	108 ± 1,25
caprilato de etila	1,60 ± 0,05	6,70 ± 0,57
metanol	1,82 ± 0,02	1,16 ± 0,02
propanol	58,0 ± 2,5	78,2 ± 1,0
isobutanol	203,5 ± 5,7	250 ± 1,13
álcool isoamílico	1095 ± 11,4	1546 ± 8,2
ácido acético	20,7 ± 0,8	21,5 ± 0,7
ácido caprílico	0,12 ± 0,03	0,118 ± 0,012
ácido cáprico	0,15 ± 0,01	0,130 ± 0,011
ácido láurico	0,017 ± 0,002	0,012 ± 0,003

<sup>a</sup> Médias de três amostras analisadas, injeções em duplicatas  
 Limite de detecção = 10<sup>-4</sup> mg/L  
 < LD = menor que o limite de detecção

Los resultados mostrados en la tabla 4 indican que la presencia de aldehídos dentro de los evaporadores de cobre es de una mayor concentración comparada con las de acero inoxidable, pero al mismo tiempo el contenido de alcoholes y esterres es mayor al de cobre aun que la presencia de ácidos carboxílicos no tubo variación alguna.

### Capacidad calorífica del mosto fermentado.

Según Valiente Banderas, 1994, la capacidad calorífica se define como la cantidad de calor necesario para elevar la temperatura 1°C y a presión constante. En los líquidos, esta dada por la ecuación del tipo:

$$C_p = a + bT$$

En donde a y b son constantes específicas de cada líquido. Una forma rápida de obtener el valor de la capacidad calorífica es mediante el uso de nomogramas.

Debido a que la variación de la capacidad calorífica con respecto a la temperatura es lineal para los líquidos, la capacidad calorífica promedio se puede calcular según Banderas, 1994, por medio de:

$$C_{pm} = (C_{p1} + C_{p2}) / 2$$

Si los líquidos son miscibles y no hay calor de disolución, la capacidad calorífica de las mezclas se logra por medio de:

$$C_p \text{ mezclas} = C_{p1} X_1 + C_{p2} X_2 + \dots$$

$C_{p1}, C_{p2}, \dots$  Capacidad calorífica de los líquidos 1, 2

$X_1, X_2, \dots$  Fracción molar de los líquidos 1, 2

### **Combustible y combustión**

Cualquier material que puede quemarse para liberar energía recibe el nombre de combustible. La mayoría de los combustibles conocidos se componen principalmente de carbono e hidrógeno, reciben el nombre de **combustibles hidrocarburos** y se denotan por la fórmula general  $C_nH_m$ . Los combustibles hidrocarburos existen en todas las fases, y algunos ejemplos son el carbono, la gasolina y el gas natural.

Una reacción química durante la cual se oxida un combustible y se libera una gran cantidad de energía recibe el nombre de **combustión**. El oxidante empleado con mayor frecuencia en los procesos de combustión es el aire, por obvias razones: es gratis y se consigue fácilmente (Yanus A. Cengel, 2004).

Cabe mencionar que poner un combustible en estrecho contacto con el oxígeno no es suficiente para iniciar la combustión. El combustible debe llevarse arriba de su temperatura de ignición para iniciar la combustión (varia según el tipo de combustible). Además, las proporciones del combustible y del aire deben de estar en un nivel adecuado para dar inicio a la combustión; por ejemplo, el gas natural no se quemará en el aire a concentraciones menores a 5% o mayores a 15% aproximadamente (Yanus A. Cengel, 2004).

### **Entalpía de combustión**

Durante una reacción química se rompen algunos de los enlaces químicos que unen a los átomos en las moléculas, y se forman otras nuevas. En general, la energía química asociada a estos enlaces es diferente para los reactivos y los productos. Esta propiedad es la **entalpía de reacción** ( $h_r$ ), que se define como la diferencia entre la entalpía de los productos en un estado específico y la entalpía de los reactivos en el mismo estado para una reacción completa (Yanus A. Cengel, 2004).

En los procesos de combustión la entalpía de reacción suele conocerse como la **entalpía de combustión** ( $h_c$ ), la cual representa la cantidad de calor liberado durante un proceso de combustión de flujo estable cuando 1 Kmol (1 Kg.) de combustible se quema por completo a una temperatura y presión específico, esto lleva a emplear otro término en la combustión de combustibles el cual es el **poder calorífico**, que se define como la cantidad de energía liberada cuando un combustible se quema por completo en un proceso de flujo estable y los productos vuelven al estado de los reactivos. En otras palabras, el poder calorífico de un combustible es igual al valor absoluto de la entalpía de combustión del combustible, es decir:

$$\text{Poder Calorífico} = h_c \text{ (KJ / Kg. combustible).}$$

Este poder depende de la fase de H<sub>2</sub>O en los productos. El poder calorífico recibe el nombre de **poder calorífico superior** (PCS) cuando el H<sub>2</sub>O en los productos esta en forma líquida y se llama poder **calorífico inferior** (PCI) cuando el H<sub>2</sub>O en los productos esta en forma de vapor (Yanus A. Cengel, 2004).

### **Gas Lp.**

Según el Instituto Mexicano del Petróleo, el gas licuado de petróleo en México es un combustible integrado por una mezcla esencialmente de propano y butano, cuya composición típica es de alrededor de 61% y 39%, respectivamente. El gas Lp se encuentra en estado gaseoso a condiciones normales, sin embargo, para facilitar su almacenamiento y transporte, se licúa y se maneja bajo presión para mantenerlo en este estado. Cabe señalar, que dependiendo del país, se puede aplicar el mismo término a productos diferentes, por ejemplo en Estados Unidos y Canadá, se conoce por gas LP al combustible constituido por propano en prácticamente un 100% ([www.imp.mx](http://www.imp.mx)).

La ventaja principal del gas Lp es que puede ser manejado con la conveniencia de un líquido y utilizado con el beneficio particular de los combustibles gaseosos. Otras ventajas son que se quema totalmente, sin dejar residuos o cenizas; no produce humo ni hollín si se le usa adecuadamente; su llama es muy caliente. Para que se tenga una combustión se requiere aire y combustible mezclados. El gas Lp para que arda requiere que tenga una concentración de aire en la mezcla de 2.4% al 9.5% aproximadamente. Si no está en este rango el gas no se quema. Esta propiedad citada, hace que el gas LP sea más seguro que otros combustibles que arden con mayor facilidad ([www.imp.mx](http://www.imp.mx)).

La temperatura de ignición del gas LP es de 493°C, lo que reduce la posibilidad de un incendio o explosión accidental. Como consecuencia de que el gas Lp no tiene olor, se le agrega odorantes para poder detectarlo en caso de fuga ([www.imp.mx](http://www.imp.mx)).

El gas LP gaseoso no es venenoso, no intoxica. Si se respira durante poco tiempo se sienten mareos; si se deja de respirarlo, se quitan y no hay consecuencias ([www.imp.mx](http://www.imp.mx)).

### **Leña.**

La leña presenta una gran diversidad de características fisicoquímicas que es preciso estudiar, según la aplicación que se desee darle. El contenido de humedad, la composición química y el poder calorífico de la leña son aspectos que hay que conocer para la construcción y el funcionamiento de los hornos ([www.fao.org/docrep/X50595/x5059505.htm#leña](http://www.fao.org/docrep/X50595/x5059505.htm#leña)).

El contenido de humedad de la leña recién cortada varía entre el 40 y el 50%; luego de estar expuesta a la intemperie, en época no lluviosa, la humedad promedio de la leña baja aproximadamente al 25%. Una de las preocupaciones de los consumidores de leña es el abastecimiento seguro. El uso exclusivo de leña procedente de las reservas naturales, sin tomar medidas para su racionalización, podrá provocar la escasez del producto. Una alternativa es la reforestación y otra el uso de reservas nativas de manera auto sostenida. Una tercera opción sería la de mejorar el aprovechamiento de los residuos agrícolas, tanto los de la explotación de bosques como los de la actividad agropecuaria [www.fao.org/docrep/X50595/x5059505.htm#leña](http://www.fao.org/docrep/X50595/x5059505.htm#leña).

### **2.3.2.2.- Quemador.**

Los quemadores son los dispositivos que permiten realizar la reacción de combustión entre el combustible y el comburente de manera controlada y regulable, asegurando la aportación adecuada de ambos para conseguir la potencia calorífica especificada, y distribuyendo la zona de reacción (llamas) y la circulación de los productos de combustión de modo que se transfiera a la carga de la forma mas eficiente posible todo el calor producido.

Según sea el combustible utilizado, los quemadores se clasifican en quemadores de gas, de combustibles líquidos y de combustibles sólidos (Marquez Manuel, 2001).

En los quemadores de gas, a falta de un sistema de clasificación universalmente aceptado, se adopta un sistema pragmático basado en el modo de alimentación del gas y del aire, estos son:

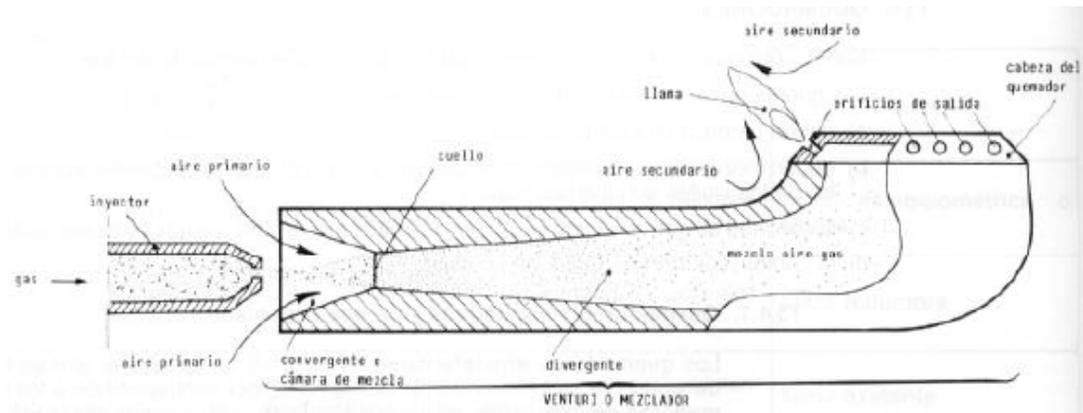
- Quemadores de premezcla a presión.
- Quemadores atmosféricos (gas a presión que induce aire).
- Quemadores oxi-gas.

Los quemadores atmosféricos (cocinas) son aquellos en los que el aire se toma del ambiente que los rodea. Se les llama así por contraposición a los quemadores de impulsión (calderas de elevada potencia, hornos), en los cuales el aire, y en algunos casos también el gas, es aportado mediante ventilación forzada (Márquez Manuel, 2001).

Para la correcta combustión de los gases de alto poder calorífico se precisa disponer de una gran cantidad de aire que los quemadores de llama blanca no podrían suministrar aunque se aumentara el número de orificios de salida del gas. Si en los quemadores de llamas blancas se emplearan gases de alto poder calorífico se producirían llamas blancas demasiado largas que se desprenderían

con facilidad. Además se correría el riesgo de producir una mala combustión (combustión incompleta) (Márquez Manuel, 2001).

Estos problemas obligaron a desarrollar unos quemadores en los cuales el aire que se precisa para realizar una combustión completa se aporta en dos etapas: en la primera una parte del aire se mezcla con el gas antes de la combustión (aire primario) y en la segunda, el resto del aire se aporta a la altura de la llama (aire secundario). Las llamas de estos quemadores cuando están bien reguladas son estables y de color azul y la combustión es completa. A estos quemadores se les denomina quemadores de premezcla ver (figura 3) (Brizuela, 2002).



**Figura N° 3.-** Quemador atmosférico de uso doméstico.

El quemador de llama azul o de premezcla, está compuesto por varias piezas, las cuales se describen a continuación (Brizuela, 2002).

### **Cabeza del quemador**

En la cabeza del quemador se encuentran los orificios de salida de la mezcla gas aire. Las cabezas de los quemadores pueden tener múltiples formas, las cuales dependen de la aplicación a la que se encuentren destinados (cocina, caldera,...) en la figura anterior se pueden observar los orificios mencionados (Brizuela, 2002).

**Inyector.**

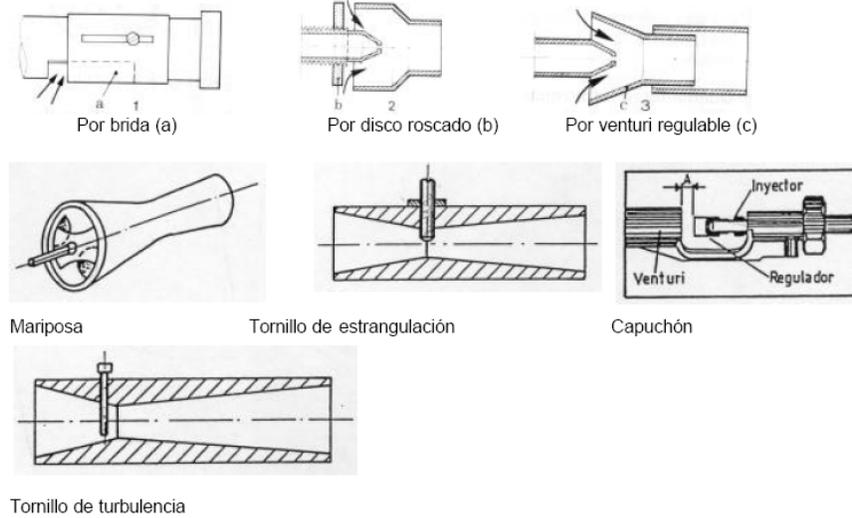
El inyector, también llamado “chicler”, es la pieza encargada de regular la potencia del quemador ver figura 4. Cuenta con un orificio que fija el caudal de gas según la presión de suministro. Cualquier modificación del diámetro del orificio provoca la variación de la potencia del quemador para la misma presión de suministro. Si un inyector funciona correctamente, no debe modificarse su calibre ya que podría dar origen a una combustión defectuosa (Brizuela, 2002).



**Figura N° 4.-** Inyector calibrado.

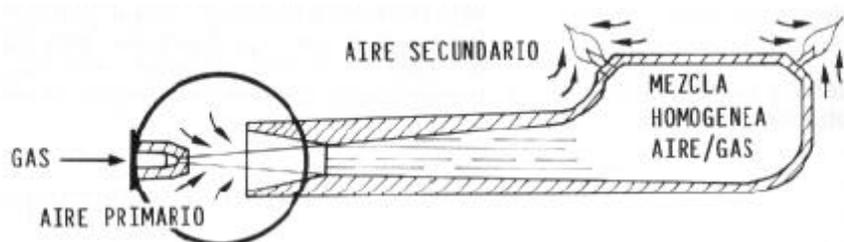
**Cámara de mezcla.**

La cámara de mezcla es el elemento encargado de realizar la mezcla del aire primario y el gas. El aire primario entra en la cámara por la misma tobera que el gas o a través de unos orificios en las paredes del tubo, los cuales se llaman lumbreras. Las lumbreras pueden tener unos mecanismos que permiten regular la entrada de aire primario ver figura 5



**Figura N° 5.-** Diferentes tipos de cámara de mezcla gas-aire.

El agujero del inyector es muy pequeño, y el gas cuando sale por éste lo hace a una velocidad muy elevada, lo que produce una depresión (efecto Ventury) que absorbe el aire primario que entra por las lumbreras mezclándose con el gas dentro del tubo ver figura 6 (Brizuela, 2002).



**Figura N° 6.-** Proceso de mezcla gas-aire dentro de la cámara.

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS.**

En este capítulo se muestran los pasos llevados a cabo en el transcurso de este trabajo para así diseñar el evaporador mediante un orden específico de procedimientos y cálculos que fueron importantes para lograr los objetivos planteados.

#### **3.1. MATERIALES.**

##### **3.1.1.- Reactivos**

Gas Lp (40% propano – 60% butano) proveedor Cova-Gas.

Miel de abeja.

Levadura (*Saccharomyces carlsbergensis*), proveniente de Cervecería Modelo del Noroeste.

Agua.

Bagazo (Agave Angustifolia) con un peso de 1,730gr. Previamente secado mediante un secador de aire caliente a 45°C por 2 hrs.

**3.1.2.- Equipo.**

Quemador Marca "FD", diámetro de 11 cm., con soporte y parrilla integrada.

Manguera de Plástico de 1.5 cm. de diámetro y 3 metros de largo.

Termómetro digital con carátula de 1 ¼ pulg. y un vástago de 5 pulgadas rango de (-40 a 230°C). Marca "Mc Master-Carr supply company".

Cronómetro marca "fisher scientific", resistente al agua con carátula de 1 ¼ de pulgadas, sistema de stop y reset.

Bandeja de 15 lts de aluminio marca "Mexiquense".

Bandeja de 15 lts de fierro.

Bascula marca "OHAUS" de acero inoxidable pesas de 18 Kg. en conjunto.

Probeta de plástico, capacidad de 250 ml. Marca "Lab-Tech".

Alcoholímetro con rango de 0-100%, escala de 5 y un largo de 300 mm., referidos a 20°C. Marca "Cole Parmer".

Brixómetro rango de 0 a 35° con escalas de 5 y referidos a 20°C, marca "Cole Parmer".

Triple y tela de asbesto.

Mechero Fisher

Condensador de vidrio para laboratorio.

Matraz bola de 250 ml.

Matraz Erlenmayer de 100 ml.

Cuchara de aluminio.

### **3.2. METODOLOGÍA:**

El presente proyecto de investigación se realizó en el laboratorio LV- 900 del Instituto Tecnológico de Sonora campus Náinari, en el período comprendido de Junio del 2005 a Febrero del 2006.

Antes de llevar a cabo la metodología, es preciso enfatizar en las terminologías de mosto fermentado y mosto residual real. Se considerará al mosto fermentado como la materia prima (mezcla binaria de etanol y agua) que será sometida a destilación en el proceso de obtención del aguardiente bacanora. Por otra parte, se llama mosto residual real al excedente que no alcanza a destilarse debido a la eficiencia del destilador. Este parámetro varía según la calidad de los materiales empleados en la fabricación del mismo. Por eso es preciso realizar una serie de pruebas al destilador propuesto para su diseño, antes de ajustar su comportamiento mediante la serie de cálculos que se presentan en este trabajo.

#### **3.2.1.- Dimensiones del evaporador**

Como parte del diseño del evaporador, es fundamental proponer las dimensiones del mismo. Estas fueron determinadas de acuerdo al volumen de producto fermentado que se pretende destilar. Es conveniente tomar en cuenta al momento de dimensionar, un volumen extra con el propósito de dejar un espacio considerable para el fenómeno de convección que ocurre dentro del evaporador al

momento de calentarlo. Se consideró que el evaporador tomaría forma cilíndrica y las dimensiones del mismo se obtendrán por medio de las siguientes ecuaciones.

$$A = \pi \times r^2 \quad (1) \qquad V = A \times H \quad (2)$$

Donde:

V = volumen (litros o m<sup>3</sup>),

A = área (m<sup>2</sup> o cm<sup>2</sup>),

H = altura (m o cm.).

$\pi = (3.1416)$

r = radio (m o cm.).

### 3.2.2.- Poder calorífico del Quemador:

Para el diseño del poder del quemador se tomó un equipo marca FD con las siguientes características:

- Diámetro de 11 cm. a la cabeza.
- Inyector para efecto ventury.
- Cámara de mezclado de gas – aire tipo disco roscado.

En la figura 7 se muestra el tipo de quemador utilizado. Al no contar con datos técnicos del mismo, fué necesario hacer una serie de pruebas para calcular un valor aproximado de su poder calórico.



**Figura 7.-** Quemador utilizado para el diseño del evaporador.

El poder calorífico del quemador se calculó por medio de la siguiente ecuación

$$P_q = (\rho_{H_2O}) (\text{Vol.}) (C_{p_{H_2O}}) (T_1 - T_2) / (t_{\text{ebullición}}) \quad (3)$$

Donde:

$P_q$  = Potencia del Quemador. (KJ/min.),

$\rho_{H_2O}$  = densidad del agua. (Kg /lit.),

Vol. = volumen de agua utilizada en la prueba. (Litros),

$C_{p_{H_2O}}$  = Capacidad calorífica del agua. (KJ/Kg °C),

$T_1 - T_2$  = diferencia de temperatura (°C),

$t_{\text{ebullición}}$  = tiempo al que ebulle el agua. (min.).

Con el propósito de obtener los datos de la ecuación (3) se realizaron las pruebas con los siguientes procedimientos:

A.- Se tomaron dos recipientes de diferentes tipos de material (Aluminio y Fierro), a los cuales se les llenó con agua hasta una capacidad de 10 lts.

B.- Se ajustó la válvula de presión del quemador a su máximo, lo que significa que se abrió a toda su capacidad al igual que la válvula de alimentación del tanque de gas.

C.- Una vez realizados los pasos A y B, se encendió el quemador y se tomó el tiempo que tardó el agua en llegar a su temperatura de ebullición, esto se realizó en los dos recipientes y por duplicado.

D.- Se repitieron los pasos del A al C, con la variación de que en esta ocasión se le agregó a los 10 lts de agua una cantidad de 1,730 gr. de bagazo a cada uno de los recipientes y se realizaron las lecturas correspondientes.

E.- Se realizó un análisis de moda de los resultados obtenidos, para así mantener una homogeneidad de los mismos y poder manejar un poder calorífico más acorde a la realidad. Los datos obtenidos se sustituyeron dentro de la ecuación (3) para calcular la potencia aproximada del quemador.

### **3.2.3.- Características fisicoquímicas del mosto (mezcla binaria).**

Las concentraciones de los otros elementos como el metanol, furfural, aldehídos, cetonas, ácidos y esterres se encuentran en cantidades muy pequeñas lo que hace posible considerar despreciable su presencia dentro de los cálculos para el diseño del evaporador.

Esto no implica que su presencia no tenga ninguna importancia en el producto final, ya que algunos de los elementos antes mencionados son responsables de ciertos tipos de cualidades dentro del sabor y olor. Cabe mencionar que la presencia de estos productos es importante en ciertas características

fisicoquímicas del mosto para poder llevar a cabo un diseño y sobre todo una predicción del comportamiento del mismo dentro del proceso de destilación, estos factores son:

### **Grados Gay Lussac.**

Esta característica es una de las más importantes dentro de una fermentación alcohólica, los azúcares presentes dentro del mosto que será fermentado son desdoblados por la acción de las levaduras, que llevan a cabo su transformación a alcohol. Debido a esto se puede deducir con anterioridad antes del proceso de fermentación la cantidad aproximada de alcohol que será producido durante el proceso fermentativo.

La ecuación que relaciona lo anterior en base a la concentración de azúcares con los grados Gay Lussac producidos durante la fermentación, en el trayecto de este trabajo, puesto que no se encuentra en bibliografía y en ningún otro tipo de antecedentes bibliográficos. Y se muestra en la siguiente ecuación:

$$G.L. = \sum_j^i [(\text{Brix}_{j,i}) (0.0027) / (0.8)] \times (100) \quad (4)$$

Donde:

G.L. son los grados Gay Lussac

Brix = a la cantidad de grados brix al inicio (i) y al final (j) de la fermentación

0.0027 = cantidad de etanol que puede producirse en un grado Brix

0.8 = cantidad de gramos de etanol seco presente en un mililitro de etanol puro.

Cabe mencionar que esta ecuación (4) para llegar a obtener la ecuación anterior fué necesario realizar una serie de pruebas para comprobar la veracidad de dicha ecuación las cuales fueron las siguientes:

A.- Se realizó un sustrato a base de:

- Agua (2 lts).
- Miel de abeja (en cantidad necesaria para ajustar los grados Brix a 17).

Este se sometió a contacto con calor durante 30 min. a 60 °C, con la intención de pasteurizar la mezcla.

B.- Una vez pasteurizado el sustrato se paso a inocular el mismo con una cantidad de 2 ml. de levadura (*Saccharomyces carlsbergensis*) previamente ambientadas.

C.- Después de 7 días de fermentación, se midieron los grados Brix que quedaron como residuo después de haber detenido la fermentación.

D.- A continuación se sometió a destilación el fermento obtenido, para obtener una cantidad de 50 ml de destilado, una vez obtenida esa cantidad de alcohol se mezcló con 50 ml de agua destilada, con el propósito de poder sumergir el alcoholímetro (hidrómetro) y que este pudiese marcar su rango en porcentaje de alcohol obtenido en la mezcla de agua destilada + destilado.

E.- Por último, se tomó el rango de medición del apartado anterior y se dividió entre dos, para eliminar el efecto ocasionado por la presencia del agua destilada dentro de la medición del por ciento de alcohol y así poder comparar los resultados del experimento con los de la ecuación (4).

### **Densidad y peso en masa del mosto.**

En base a los datos presentados en la tabla de densidades en el apéndice 2, se dedujo la densidad del mosto fermentado en base al porcentaje de alcohol presente en el mismo. De esta manera se calculó el porcentaje en peso del mosto y se sustituyó dicho valor en la ecuación (5), lo cual fue necesario interpolar para obtener resultados más exactos.

La ecuación (5) permitió conocer el grado en el que se encuentran presentes los componentes de la mezcla binaria (etanol + agua) dentro de mosto en su peso en masa.

$$W_m = (\text{Volumen}) (\rho_{\text{Mosto}}) \quad (5)$$

Donde:

$W_m$  = peso en masa del mosto en general (Kg)

Volumen = cantidad de mosto (litros)

$\rho_{\text{Mosto}}$  = densidad del mosto a las diferentes [ ] de alcohol (Kg / litros).

### **Capacidad calorífica del mosto.**

Para calcular la capacidad calorífica del mosto, se tomó en cuenta las constantes mostradas en la tabla 5 y se sustituyeron en la siguiente ecuación:

$$C_{pm} = (C_{p1}) (W_1) + (C_{p2}) (W_2) \quad (6)$$

Donde:

$C_{pm}$  = capacidad calorífica del mosto (KJ /°C).

$C_{p1}$  y  $C_{p2}$  = capacidad calorífica de los componentes del mosto (KJ/Kg °C).

$W_1$  y  $W_2$  = peso en masa de los componentes del mosto (Kg).

**Tabla 5.-** Valor de las capacidades caloríficas del agua y del etanol que serán utilizadas como constantes dentro del diseño del evaporador.

Agua		Etanol	
Capacidad Calorífica	$C_p = 4.182 \text{ KJ/Kg. } ^\circ\text{C}$	Capacidad Calorífica	$C_p = 2.597 \text{ KJ/Kg. } ^\circ\text{C}$

Resultados obtenidos mediante el Software EES (Engineering Equation Solver), aplicados a condiciones normales de presión y temperatura.

### Calor de ebullición de la mezcla binaria.

La ecuación número (7) fué utilizada con el fin de obtener la información sobre la cantidad de calor que se debe aplicar para llevar a la ebullición y posterior evaporación del etanol, con el propósito de aislarlo.

$$Q_e = (C_{pm}) (T_2 - T_1) \quad (7)$$

Donde:

$Q_e$  = calor de ebullición del mosto (KJ).

$C_{pm}$  = capacidad calorífica del mosto (KJ/°C).

$(T_2 - T_1)$  = gradiente de temperatura (°C).

### 3.2.4.- Temperatura de evaporación del etanol.

Este aspecto es importante en el sentido de indicar a que temperatura se generan las primeras gotas de vapor del etanol, y así evitar una posible evaporación del agua ahorrando el gasto innecesario de gas o leña. La ecuación (8) se utilizó para encontrar la temperatura de evaporación del etanol.

$$T(^{\circ}\text{C}) = (60.526) (\text{G.L}/100)^4 - (168.16) (\text{G.L}/100)^3 + (163.16) (\text{G.L}/100)^2 - (83.438)(\text{G.L}/100) + 100 \quad (8)$$

Donde:

$T(^{\circ}\text{C})$  = temperatura a la cual evapora el etanol ( $^{\circ}\text{C}$ ).

G.L. = grados Gay Lussac.

### 3.2.5.- Tiempo de ebullición del etanol en el mosto fermentado.

Con el propósito de deducir el momento en el cual el etanol comienza a evaporarse y de ésta manera reducir los tiempos empleados para éste fenómeno y poder utilizarlos en otro aspecto del proceso de producción, se empleó la siguiente ecuación:

$$E_{\text{etanol}} = (Q_e) / P_q \quad (9)$$

Donde:

$E_{\text{etanol}}$  = tiempo de ebullición del etanol (min.).

$Q_e$  = calor de ebullición de la mezcla (KJ).

$P_q$  = potencia del quemador (KJ/min.).

### 3.2.6.- Porcentaje de etanol en el destilado.

De acuerdo a la ecuación (10) se pudo deducir con anticipación a la destilación el índice porcentual con el que se obtendrá el etanol dentro del producto final.

$$\% \text{Vap} = \frac{[(-94.7613) (G.L)^8 + (450.932) (G.L.)^7 - (901.175) (G.L)^6 + (985.803) (G.L)^5 - (644.997) (G.L)^4 + (259.985) (G.L)^3 - (64.5050) (G.L)^2 + (9.71706) (G.L)]}{(100)} \quad (10)$$

Donde:

%Vap= cantidad de etanol presente en el vapor (%).

G.L = grados Gay Lussac.

### 3.2.7.- Cantidad de destilado a una eficiencia del 100%.

Para estimar la cantidad de producto final que se obtiene después de la destilación, se utilizó la ecuación de Rayleigh dada por la ecuación (11), sin embargo en este caso en específico donde la eficiencia de los sistemas unitarios como lo es el destilador, es imposible considerar una rendimiento del 100%. Aun así, para los fines de los cálculos, se consideró al principio una eficiencia al 100%, para posteriormente estos resultados sirvan de base a los cálculos reales.

$$\ln F/W = \ln (1/y-x_1) - \ln (1/y-x_2) \quad (11)$$

Donde:

F = cantidad de muestra inicial (Mol o Kg).

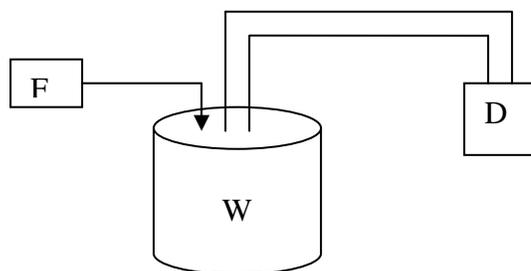
W = cantidad de remanente después de la destilación (Mol o Kg).

y = componente mas volátil en el vapor destilado (fracción masa o molar).

$x_1$  = componente mas volátil en la carga inicial (Fracción masa o molar).

$x_2$  = componente mas volátil en la carga residual (fracción masa o molar).

Una vez aplicada la ecuación (11), se necesitó realizar un balance de materia en el proceso de destilación del cual se deriva la ecuación (12) y de esta forma estimar la cantidad del destilado. El balance de materia fué realizado en base al esquema mostrado en la figura siguiente:



**Figura 8.-** Representación del balance general de materia de un proceso de destilación intermitente.

$$D = F - W \quad (12)$$

Donde:

D = cantidad de destilado (moles o Kg).

F = cantidad de muestra inicial (Mol o Kg).

W = cantidad de remanente después de la destilación (Mol o Kg).

Una vez implementada la ecuación (12), se tomó la densidad de la muestra “D” en base a su % de alcohol, y así se estimó el volumen en litros del producto destilado, aplicando la ecuación (13):

$$\text{Producto} = D/\rho_{\text{etanol}} \quad (13)$$

Donde:

Producto = cantidad de destilado final (litros).

D = cantidad de destilado (moles o Kg).

$\rho_{\text{etanol}}$  = densidad del destilado según su % de alcohol (Kg /litros).

### 3.2.8.- Cantidad de gas Lp gastados.

Según el área donde se encuentre la fuente de abastecimiento de las gaseras locales será la composición del gas Lp. En el área local de ciudad Obregón se maneja la concentración establecida en la Tabla N°3 de Anexos. Para fines prácticos en este trabajo se manejaron las siguientes concentraciones y sus respectivos poderes caloríficos sometidos a las siguientes unidades:

- Propano = 40%
- Butano = 60%

Estos porcentajes reflejan las concentraciones con las que comercializa el Gas Lp para uso doméstico, convirtiéndola en un valor estándar.

- Poder calorífico = 49, 622 KJ/Kg.
- Poder Calórico = 27, 402.9 KJ/lit.

A partir de la ecuación (14) se obtuvo la cantidad de Gas Lp gastados durante el proceso de ebullición, conforme al poder calorífico del quemador.

$$\text{GasLp} = (Q_e) / (P_c) \quad (14)$$

Donde:

GasLp = cantidad de gas Lp gastados (Kg O litros.).

$Q_e$  = calor de ebullición de la mezcla (KJ).

$P_c$  = poder calórico del Gas Lp = (KJ/Kg O KJ/litros.).

### 3.2.9.- Cantidad de leña.

Para el cálculo de la cantidad de leña que se requiere en el proceso de evaporación se presentan problemas relacionados con las propiedades de la misma. Estas propiedades son:

- Tipo de madera
- Tipo de corte en relación al diámetro del leño.
- Porcentaje de humedad presente.

Por estos motivos se calculó una cantidad de leña aproximada a utilizar. Con el propósito de llevar a cabo esta acción, fué necesario apoyarse en la ecuación (15) y en la tabla 4 de los anexos. De esta forma se obtuvo una aproximado del volumen en masa requerido para ebulir el etanol dentro del mosto.

$$\text{Leña} = Q_e / P_L \quad (15)$$

Donde:

Lena = cantidad de leña utilizada para ebulir al etanol o los alcoholes de interés (Kg).

$Q_e$  = calor de ebullición de la mezcla binaria (KJ).

$P_L$  = poder calórico de la leña (KJ / Kg).

### 3.2.10. Cantidad real del destilado.

Como se mencionó anteriormente (apartado 3.2.7), los rendimientos de las propiedades unitarias de cualquier tipo, nunca llegan a desarrollar una eficiencia total. Por lo tanto, se requiere calcular su desempeño real con el fin de controlar mejor su funcionamiento y producción. Como factores claves en este trabajo, se consideró sustituir la cantidad de destilado (obtenida en la ecuación 12) dentro de la (16):

$$\text{Destilación real} = (D) (\% \text{ efectividad}/100) \quad (16)$$

Donde:

Destilación real = cantidad de destilado real (Kg o litros.).

D = Cantidad de destilado simulando una efectividad del 100% (Kg o litros.).

% efectividad = es el porcentaje real al que trabaja el destilador.

Una vez obtenida la “destilación real” es preciso calcular la cantidad residual en la destilación, esto se obtiene despejando “W” de la ecuación (12) y sustituyendo el valor de “D” por el de “Destilación real”.

### 3.2.11. Porcentaje de alcohol en el mosto residual.

Tomando la ecuación (11) de Rayleigh y despejando “X<sub>2</sub>”, se obtuvo la cantidad de alcohol dentro del mosto residual real, la ecuación (17) fue utilizada para este fin.

$$X_2 = \frac{1 - ((y) (e^{-(\text{Ln}(F/W) - \text{Ln}(1/y-x_1))}))}{e^{((\text{Ln}(F/W) - \text{Ln}(1/y-x_1))}} \times 100 \quad (17)$$

Donde:

F = cantidad de muestra inicial (Mol o Kg).

W = cantidad de remanente después de la destilación (Mol o Kg).

$x_1$  = componente mas volátil en la carga inicial (Fracción masa o molar).

$x_2$  = componente mas volátil en la carga residual (fracción masa o molar).

### **3.2.12. Temperatura de ebullición del etanol en el mosto residual real.**

Para calcular la temperatura del mosto residual real, se tomó la ecuación (8) y se sustituyó el valor del resultado de la ecuación 17 en este caso " $X_2$ ", tomando a este último como los grados Gay Lussac (G.L.) dentro de la ecuación 8.

### **3.2.13. Características térmicas del mosto residual real.**

#### **Capacidad calorífica del mosto residual real.**

Este aspecto se calculó al igual que en el apartado 3.2.3.4 con la ecuación (6), ya que fué necesario conocer este apartado para poder llegar a medir el calor total de ebullición del mosto residual real, no sin antes haber calculado la composición en peso de los componentes (agua – etanol) en base a su presencia en la mezcla residual real.

#### **Calor de ebullición del mosto residual real.**

El cálculo de este aspecto termodinámico, provee los datos necesarios para determinar la cantidad de calor necesario para llevar a cabo la evaporación de las primeras gotas de etanol dentro del mosto residual real.

De la misma manera que como fué indicado en la sección 3.2.3.5., se deberán llevar a cabo los cálculos pertinentes a esta incógnita térmica, de la cual fueron obtenidos datos muy útiles para secciones posteriores.

### 3.2.14. Tiempo total de destilación.

De la misma manera que se calculó el tiempo para evaporar el mosto fermentado de los apartados anteriores utilizando la ecuación (9), se calculó el tiempo de evaporación del mosto residual real. Esto con el propósito de conocer el tiempo exacto en el cual se tomará la ultima gota de etanol dentro del proceso de destilación. Además de la ecuación anterior es necesario aplicar una operación matemática expresada en la ecuación (18) la cual muestra lo siguiente:

$$\text{Tiempo total} = (E_{\text{etanol}} - E_{\text{etanol residual}}) + E_{\text{etanol}} \quad (18)$$

Donde:

Tiempo total = tiempo requerido para que evapore el total de etanol, según el porcentaje de efectividad del destilador (hrs.).

$E_{\text{etanol}}$  = tiempo requerido para evaporar las primeras gotas de etanol del mosto fermentado (hrs.).

$E_{\text{etanol residual}}$  = tiempo requerido para evaporar las primeras gotas de etanol del mosto residual real (hrs.).

### 3.2.15. Cantidad total de gas Lp gastados en la destilación.

Apegados de nuevo a la ecuación (14) (sección 3.2.8.2.), y haciendo uso del mismo razonamiento matemático de la ecuación (18) se obtuvo el gasto total de

gas Lp llevado en todo el proceso de separación del etanol. De la misma manera se desarrolló la ecuación (19).

$$\text{Total de Gas Lp} = (\text{Gas Lp} - \text{Gas Lp}_{\text{residual}}) + \text{Gas Lp} \quad (19)$$

Donde:

Total de Gas Lp = cantidad total de gas Lp empleada en el proceso de destilación del etanol (Kg).

Gas Lp = cantidad de gas Lp empleados para evaporar las primeras gotas de etanol del mosto fermentado (Kg).

Gas Lp<sub>residual</sub> = cantidad de gas Lp empleados para evaporar las primeras gotas de etanol del mosto residual real. (Kg).

### 3.2.16. Cantidad total de leña gastada en la destilación.

Una vez más se aplicaron los cálculos de secciones anteriores, en este caso utilizando la ecuación (15) (sección 3.2.9), y aplicando el razonamiento matemático, de la sección anterior se obtuvo así la ecuación:

$$\text{Total de leña} = (\text{leña} - \text{leña}_{\text{residual}}) + \text{leña} \quad (20)$$

Datos:

Total de leña = cantidad neta o total de leña empleada para evaporar totalmente el etanol mediante todo el proceso de destilación (Kg).

Leña = cantidad de leña empleada para evaporar la primera gota de etanol presente en el mosto fermentado (Kg).

Leña<sub>residual</sub> = cantidad de leña empleada para evaporar la primera gota de etanol presente en el mosto residual real (Kg).

## IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en la parte experimental de este trabajo en los cuales se desarrolla cada uno de los pasos de la metodología, tomando como base ciertas condiciones fisicoquímicas de un mosto fermentado en particular, y mostrando al final de este capítulo una serie de tablas que reflejan el comportamiento del evaporador con mostos en condiciones fisicoquímicas diferentes.

### 4.1. RESULTADOS

#### 4.1.1.- Dimensiones del evaporador.

Las dimensiones fueron calculadas en base a un evaporador para intercambiar calor a 200 litros de mosto fermentado, ya que es el volumen que la mayoría de los productores vinateros utilizan en sus procesos. Considerando dejar un margen de 50 litros, se propone tomar una capacidad del evaporador equivalente a 250 litros con un diámetro de 48 cm. Tomando en cuenta el alcance del quemador empleado. Aplicando la ecuación 1 y 2, los resultados obtenidos son:

Diámetro = 48 cm.

Altura = 1.38 m.

#### 4.1.2.- Poder calorífico del quemador.

Según el procedimiento propuesto en el apartado 3.2.2., ecuación (3) se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 6.

**Tabla 6.-** Resultados de las pruebas realizadas al quemador para calcular su poder calorífico.

<b>Solo Agua capacidad de 10 litros</b>			
<b>Material</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Minutos</b>
Fierro	100°C	10' 19"	10.3167
Aluminio	100°C	10' 03"	10.05
<b>Agua 10 litros + 1.730 bagazo</b>			
<b>Material</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Minutos</b>
Fierro	100°C	10' 08"	10.133
Aluminio	100°C	8' 47"	10.233

Aplicando la ecuación (3) se calculó el poder calorífico del quemador según los tiempos obtenidos en la tabla 6. Los resultados se aprecian en la tabla 7

**Tabla 7.-** Resultado del poder calorífico del quemador una vez sustituidos los datos en la ecuación (3).

<b>Solo agua capacidad de 10 litros</b>	
<b>Material</b>	<b>Poder Calórico del quemador</b>
Fierro	275.646 KJ/min.
Aluminio	282.91194 KJ/min.
<b>Agua 10 litros + 1.730 bagazo</b>	
Fierro	280.6434422 KJ/min.
Aluminio	279.2721755 KJ/min.

Aplicando un análisis de moda a los datos de la tabla 7 se eliminan los valores 275.646 KJ/min. y 282.91194 KJ/min. Posteriormente se obtiene un promedio de los valores restantes, dando como resultado lo siguiente:

Moda = 279.2721755 KJ/min.

Se procedió a tomar como el poder calórico del quemador al resultado que se obtuvo en la moda y fue considerada una constante dentro del diseño del evaporador.

$P_q = 279.2721755$  KJ/min.

#### **4.1.3.- Grados Gay Lussac del mosto fermentado.**

En base a los comportamientos más usuales del microorganismo *S. carlbergensis* en este tipo de fermentaciones, se consideraron los siguientes valores de grados Brix antes y después de la fermentación respectivamente:

- Brix<sub>inicial</sub> = 17
- Brix<sub>final</sub> = 3

Sustituyendo los datos anteriores en la ecuación 4 y se obtuvo que:

G.L. = 4.725 %

**4.1.4.- Densidad del mosto fermentado.**

Tomando como referencia al anexo 2 se supuso la densidad del mosto fermentado, y se empleó un sistema de interpolación para encontrar un valor de densidad más exacta, obteniendo así lo siguiente:

$$\rho_{\text{Mosto}} = 0.9839725 \text{ Kg. /litro}$$

**4.1.5.- Peso en masa del mosto fermentado.**

Considerando el valor de densidad calculado en el punto anterior y aplicando la ecuación (5), se obtuvo el peso de la masa del mosto fermentado, el cual fue:

$$W_m = 196.7945 \text{ Kg.}$$

Este peso se distribuye en los componentes de la mezcla binaria de acuerdo a la ecuación (4), quedando de la siguiente manera:

$$\text{Etanol (4.725\%)} = 9.298540125 \text{ Kg.}$$

$$\text{Agua (95.275\%)} = 187.4959599 \text{ Kg.}$$

**4.1.6.- Capacidad calorífica del mosto fermentado.**

La capacidad calorífica del mosto fermentado fue calculada utilizando la ecuación (6).

$$C_{pm} = 808.2564129 \text{ KJ/}^\circ\text{C}$$

**4.1.7.- Temperatura de evaporación del etanol en el mosto fermentado.**

Se calculó la temperatura a la cual el etanol evapora, utilizando la ecuación (8), y así controlar una posible evaporación del agua obteniendo lo siguiente:

$$T^{\circ}\text{C} = 96.40438212 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

**4.1.8.- Calor de ebullición del mosto fermentado.**

Con el propósito de predecir la cantidad de calor que se deberá aplicar a la mezcla binaria para llevarla a la temperatura calculada en el punto anterior, se utilizó la ecuación (7), obteniéndose lo siguiente:

$$Q_e = 52055.25487 \text{ KJ}$$

**4.1.9.- Tiempos de ebullición del etanol en el mosto fermentado.**

Aplicando la ecuación (9) se encontró el tiempo al cual comenzará a separarse el etanol del agua el cual fue de:

$$E_{\text{etanol}} = 186.3961376 \text{ min.} = 3.106602294 \text{ hrs.}$$

**4.1.10.- Porcentaje de alcohol en el destilado del mosto fermentado.**

Utilizando la ecuación (10) se predijo el porcentaje de etanol en el destilado del mosto fermentado de tal manera que:

$$\%Vap = 33.95525805 \%$$

#### **4.1.11.- Cantidad de destilado obtenido considerando una efectividad del 100%.**

Siguiendo la ley de Rayleigh, ecuación (11) y tomando  $x_2$  dentro de la ecuación se toma automáticamente como 0, lo que indica que no existirá residuo alguno etanol después de terminada la destilación. Se obtuvo lo siguiente:

$$W = 169.4055747 \text{ Kg.}$$

Empleando la ecuación (12) se obtiene que:

$$D = 27.38468402 \text{ Kg.}$$

Una vez obtenida la cantidad en masa del destilado como producto final se aplicó la ecuación (13), tomando como densidad la siguiente interpolación:

$$\rho_{\text{etanol}} = 0.959876077 \text{ Kg. /litros}$$

Sustituyendo en la ecuación (13) se observa que:

$$\text{Producto} = 28.52939529 \text{ litros.}$$

**4.1.12.- Cantidad de gas Lp gastados para evaporar las primeras gotas de etanol en el mosto fermentado.**

De acuerdo a la ecuación 14 se calculó la cantidad de gas empleada obteniéndose lo siguiente:

$$\text{GasLp} = 1.049035808 \text{ Kg.}$$

**4.1.13.- Cantidad de leña gastada para evaporar las primeras gotas de etanol en el mosto fermentado.**

Se calculó una aproximación de la cantidad necesaria para llevar a cabo el inicio de la evaporación del etanol dentro del mosto, teniendo como resultado:

$$\text{Leña} = 2.66950025 \text{ Kg.}$$

**4.1.14. Cantidad real del destilado.**

Una vez aplicado el procedimiento de la sección 3.2.10 y suponiendo una efectividad del 70%, se obtuvo:

$$\text{Destilación real} = 19.16927881 \text{ Kg.}$$

Mediante la ecuación (12) y despejando W, se obtuvo el mosto residual real.

$$W_{\text{residual}} = 177.6252212 \text{ Kg.}$$

**4.1.15. Porcentaje de alcohol en el mosto residual real.**

Aplicando la ecuación (17) se obtuvo la cantidad de etanol presente en el mosto residual real, el cual fue de:

$$X_2 = 1.57047632 \%$$

**4.1.16. Temperatura de ebullición del etanol en el mosto residual real.**

Con el propósito de observar y comprobar que entre menor sea la concentración de etanol presente en el mosto, sin importar la cantidad de volumen con el que se cuente, la temperatura de ebullición deberá ser cada vez mas cercana a 100°C. Este aspecto sirvió como apoyo para poder calcular los valores “reales”(eficiencia del 70%) dentro del proceso de destilación obteniendo así los datos que se pretenden monitorear en el proceso, de tal manera que con la ecuación (8) y de acuerdo a la sección 3.2.12, se obtuvo que:

$$T^{\circ}\text{C} = 98.72922001^{\circ}\text{C}$$

**4.1.17. Características térmicas del mosto residual real.****Capacidad calorífica del mosto residual real.**

Se aplicó un procedimiento semejante a la sección 4.6 y con el apoyo de la ecuación (6) se encontró la capacidad calorífica del mosto residual.

$$C_{pm} = 738.4072192 \text{ KJ}/^{\circ}\text{C}$$

**Calor de ebullición del mosto residual real.**

En base en la ecuación (7) se sustituyen los valores de temperatura de ebullición y la capacidad calorífica del mosto residual real, se encontró que el calor de ebullición fue:

$$Q_e = 49273.33779 \text{ KJ}$$

**4.1.18. Tiempo total de la destilación.**

Aplicando la ecuación (9) se obtuvo un tiempo de ebullición del mosto residual real igual a:

$$E_{\text{etanol residual}} = 2.940580439 \text{ Hrs.}$$

Para obtener el tiempo total se aplicó la ecuación (18):

$$\text{Tiempo total} = 3.272624149 \text{ Hrs.}$$

**4.1.19 Cantidad total de gas Lp gastados en la destilación.**

La cantidad total de gas Lp gastados en todo el trayecto de destilación está dada por la ecuación (19), pero de igual manera apoyada en la ecuación (14) que tiene el propósito de calcular la cantidad de gas empleado del cual se obtuvo lo siguiente:

$$\text{GasLp}_{\text{residual}} = 0.992973636 \text{ Kg.}$$

Para el cálculo de la cantidad total de gas Lp se sustituyo el resultado anterior en la ecuación (19).

Total de Gas Lp = 1.10509798 Kg.

#### **4.1.20. Cantidad total de leña gastada en la destilación.**

Resultado obtenido al aplicar la ecuación (15):

Leña<sub>residual</sub> = 2.526837835 Kg.

Sustituyendo los valores anteriores dentro de la ecuación (20), se obtuvo el total de leños gastados en el proceso de destilación.

Total de leña = 2.812162664 Kg.

#### **4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.**

Como se pudo observar, fué necesario desarrollar una serie de cálculos que permitieran poder predecir y especificar el comportamiento de la destilación, que depende directamente de aspectos como: dimensiones del evaporador, poder calórico del quemador, características fisicoquímicas tanto del mosto fermentado y el mosto residual real. Por otra parte, es necesario diferenciar las propiedades térmicas y fisicoquímicas de los mostos antes mencionados, para poder llevar a cabo la serie de cálculos presentados en este trabajo.

Las propiedades fisicoquímicas antes mencionadas son: grados Gay Lussac, densidad, peso en masa, capacidad calorífica y calor de ebullición. Al mismo tiempo, las características antes mencionadas dan hincapié a otros parámetros importantes dentro del proceso, como son: temperatura de evaporación del etanol, tiempos de ebullición dados por el tipo de fuente de energía, cantidad empleada de fuente de energía y por su puesto el porcentaje de alcohol en el destilado.

A continuación se muestran las tablas 8 y 9 en las cuales se observan las propiedades fisicoquímicas y térmicas del mosto fermentado y del mosto residual real.

La tabla 8 representa un proceso de destilación con una eficiencia del 100% la cual sirve de apoyo para los cálculos finales, ya que la Tabla 9, refleja el comportamiento del mosto residual real dentro de una destilación de una eficiencia del 70%, la cual es la eficiencia que se toma como real, ambas tablas (8 y 9) son clave para calcular los resultados finales.

**Tabla 8.-** Comportamiento del evaporador según las características fisicoquímicas del mosto fermentado dentro del proceso de destilación, suponiendo una efectividad del 100%

°Brix iniciales	°Brix finales	% de etanol en el fermento.	Temperatura de Evaporización del Etanol (°C).	*Tiempo de ebullición de la primera gota de Etanol (hrs.)	% de etanol en el destilado	Destilado a una eficiencia del 100% (Litros)	GasLp empleado por el mosto fermentado (Kg.)	Leña (Encino) empleada por el mosto fermentado (Kg.)
17	3	4.725	96.40438212	3.106602294	33.95525805	28.52939529	1.049035808	2.66950025
17	2	5.0625	96.1726919	3.087259492	35.64154152	29.14622402	1.042504141	2.652878999
17	1	5.4	95.94415807	3.068137859	37.2509391	29.76896762	1.036047158	2.636447799
17	0	5.7375	95.71874476	3.049234359	38.7869004	30.39748164	1.029663834	2.62020404
16	3	4.3875	96.63926479	3.12616933	32.18850576	27.91862007	1.055643194	2.686314184
16	2	4.725	96.40438212	3.106602294	33.95525805	28.52939529	1.049035808	2.66950025
16	1	5.0625	96.1726919	3.087259492	35.64154152	29.14622402	1.042504141	2.652878999
16	0	5.4	95.94415807	3.068137859	37.2509391	29.76896762	1.036047158	2.636447799
15	3	4.05	96.87737614	3.145963697	30.33756451	27.3140311	1.062327346	2.703323464
15	2	4.3875	96.63926479	3.12616933	32.18850576	27.91862007	1.055643194	2.686314184
15	1	4.725	96.40438212	3.106602294	33.95525805	28.52939529	1.049035808	2.66950025
15	0	5.0625	96.1726919	3.087259492	35.64154152	29.14622402	1.042504141	2.652878999

\* representa valores dependientes solo del Gas Lp como fuente de energía.

**Tabla 9.-** Representa el comportamiento del mosto residual real según sus características fisicoquímicas, dentro de un destilador con una eficiencia del 70%.

°Brix iniciales en el mosto fermentado	°Brix finales en el mosto fermentado	Mosto residual real (lts.)	Temperatura de evaporación del mosto residual (°C)	*Tiempo de ebullición del mosto residual real (Hrs.)	Gas Empleado Por el mosto Residual real (Kg.)	Leña empleada para el mosto residual real (Kg.)
17	3	177.6252212	98.72922001	2.940580439	0.992973636	2.526837835
17	2	176.9906357	98.63848047	2.924796928	0.987643869	2.51327508
17	1	176.3519104	98.54771056	2.908978783	0.982302406	2.499682563
17	0	175.7091329	98.45690446	2.893127485	0.976949748	2.48606156
16	3	178.2555844	98.81993519	2.956327922	0.998291238	2.540369632
16	2	177.6252212	98.72922001	2.940580439	0.992973636	2.526837835
16	1	176.9906357	98.63848047	2.924796928	0.987643869	2.51327508
16	0	176.3519104	98.54771056	2.908978783	0.982302406	2.499682563
15	3	178.8816479	98.91063219	2.972038071	1.003596233	2.553869347
15	2	178.2555844	98.81993519	2.956327922	0.998291238	2.540369632
15	1	177.6252212	98.72922001	2.940580439	0.992973636	2.526837835
15	0	176.9906357	98.63848047	2.924796928	0.987643869	2.51327508

\* representa valores dependientes solo del Gas Lp como fuente de energía.

---

Dentro de la tabla 10 se observa el comportamiento real del fenómeno de destilación según la eficiencia en los grados brix del mosto fermentado. Así mismo en esta tabla se refleja el comportamiento definitivo del proceso de destilación, mostrando el volumen total de destilado, tiempos y los gastos totales y reales de la fuente de energía empleada en el proceso.

Otro de los aspectos relevantes en la tabla 10, es que indica exactamente la cantidad de suministro de energía empleada en el destilado, como es el caso del Gas Lp. En el caso de la leña, sólo es conveniente determinar un aproximado de lo que se va a gastar en cada lote ya que es imposible calcular con exactitud su comportamiento. Esto depende de muchos factores como: la humedad, el grosor del tronco y el tipo de madero empleado, Es por ello que la representación de la cantidad de leña empleada refleja sólo un aproximado de lo que el vinatero debe tener al alcance al momento de destilar para que no pierda el tiempo en estar recolectando o en el caso de tenerlo en bodega, mantener una cantidad igual a la indicada en la tabla a la mano.

Por otro lado el tiempo de evaporación del etanol que se muestra en las tablas (8, 9 y 10) es reflejo solo del comportamiento del evaporador cuando la fuente de energía es exclusivamente el Gas Lp, por los motivos ya antes mencionados sobre el uso de leña como suministro de energía.

**Tabla 10.-** Representa el comportamiento real del destilador a una eficiencia del 70%.

°Brix iniciales	°Brix finales	% de etanol en el destilado	Destilado total a un eficiencia del 70% (lts.)	*Tiempo de ebullición de la primera gota de Etanol (hrs.)	*Tiempo en que sale la última gota de etanol (min.)	*Tiempo total de la destilación (hrs.)	Total de Gas Lp Gastados en el proceso (Kg.)	Total de Leña Gastada en el Proceso (Kg.)
17	3	33.95525805	19.9705767	3.106602294	9.961311313	3.272624149	1.10509798	2.812162664
17	2	35.64154152	20.40235681	3.087259492	9.747753888	3.249722057	1.097364413	2.792482919
17	1	37.2509391	20.83827734	3.068137859	9.549544576	3.227296935	1.08979191	2.773213034
17	0	38.7869004	21.27823715	3.049234359	9.366412408	3.205341232	1.08237792	2.754346521
16	3	32.18850576	19.54303405	3.12616933	10.19048447	3.296010738	1.11299515	2.832258736
16	2	33.95525805	19.9705767	3.106602294	9.961311313	3.272624149	1.10509798	2.812162664
16	1	35.64154152	20.40235681	3.087259492	9.747753888	3.249722057	1.097364413	2.792482919
16	0	37.2509391	20.83827734	3.068137859	9.549544576	3.227296935	1.08979191	2.773213034
15	3	30.33756451	19.11982177	3.145963697	10.43553753	3.319889322	1.121058458	2.85277758
15	2	32.18850576	19.54303405	3.12616933	10.19048447	3.296010738	1.11299515	2.832258736
15	1	33.95525805	19.9705767	3.106602294	9.961311313	3.272624149	1.10509798	2.812162664
15	0	35.64154152	20.40235681	3.087259492	9.747753888	3.249722057	1.097364413	2.792482919

\* representa valores dependientes solo del Gas Lp como fuente de energía.

## V. CONCLUSIONES.

- Se desarrolló una ecuación con la cual es posible poder estimar el contenido de alcohol que potencialmente será producido al momento de la fermentación y así poder desarrollar variables posteriores en el comportamiento del evaporador.
- El contenido de azúcar medido en grados Brix, afecta directamente al comportamiento del proceso de destilación, desde su evaporación dentro del evaporador diseñado, hasta el momento de su condensación en la cantidad de producto final obtenido.
- Se constató que la fuente de energía mas conveniente para llevar a cabo el proceso de intercambio de temperatura fue sin duda el Gas Lp, gracias a sus bondades prácticas ya sea de transporte, poder calórico y sobre todo por que reduce la presencia de componentes como CO (monóxido de carbono) y NO (oxido de nitrógeno).
- Se demostró cuantitativamente y bibliográficamente que las bondades de la leña son muy reducidas, ya que no proporcionan ninguna seguridad en cuanto a estabilidad de la llama, velocidad de combustión, emisión de CO (monóxido de carbono) y NO (oxido de nitrógeno), además deteriorar con el tiempo el material del cual este construido el evaporador, provocando posibles gastos futuros.

En general tomando en cuenta las conclusiones anteriores, se logro establecer un sistema de seguimiento al comportamiento del mosto fermentado dentro del proceso de evaporación. De esta manera el vinatero que desee implementar el proceso de destilación propuesto, podrá controlar el comportamiento del sistema y así obtener un mayor rendimiento en su proceso que se vera reflejado en sus productos y sobre todo en su bolsillo.

## LITERATURA CITADA.

Barderas Valiente (1994). Problemas de Balance y energía en la industria Alimentaria. Editorial LIMUSA. México. P. 134-137.

Baumeister y Marks (1986). manual del ingeniero mecánico de Marks. Editorial Hispano Americano. México. P. 38.

Bourgeois C.M. (2002). Microbiología alimentaria. 2<sup>da</sup> impresión. Editorial ACRIBIA. P. 24-26.

B.V. KARLEKAR (1985). Transferencia de calor. 2<sup>da</sup>impresion. Editorial Mc Graw-Hill. México. P. 399 – 529.

C.J. Geankoplis (2002). Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias, 3<sup>ra</sup>impresion. Editorial CECSA. México. P. 386-390

Doyle y Beuchat (1997). Traditional fermented foods. Editorial ASM Press. Washington. p. 629 – 648.

---

F.B. Wright (2001). Distillation of Alcohol. 2<sup>da</sup> impression. Camelot Press. P. 4-8.

John H. Lienhard IV (2002). A Heat Transfer. 3<sup>ra</sup> Edition, Cambridge. Massachusetts. P. 132 – 135.

Jorge A. Rodríguez (2001). Introducción a al Termodinámica. Editorial Mussa. México D.f., Pág. 410-413.

Klaus Erich Shmitz (2000), Modelado y simulación de una torre de destilación multicomponenete. Editorial Matlab. México D.f. P. 15-17.

Marcilla Gomis A. (1998). Introducción a las Operaciones de Separación. Editorial Espagrafic. P. 33-35

Martínez Marquez Manuel (2001). Combustión y quemadores. Edit. Boixareu. Barcelona España. P. 79-88.

Mike Nixon y Mike McCaw (1999). The Compleat Distiller. 2<sup>da</sup> edition. Amphora Society publication. P. 98-112

Norma Oficial Mexicana NOM-168-SCFI-2004, bebidas alcoholica-bacanora, especificaciones, envasado y etiquetado.

---

Núñez Noriega Luis (2002). Estrategias para el desarrollo de la industria del bacanora. CIAD Sonora. P. 39-50, 60, 231.

Perry, John H. (1960). Manual del ingeniero químico. Uteha México D.F. volúmen II. P. 368-371, 411,

Peter J. Wheeler & R. Malcolm Willmott (1998), Spirits Unlimited, 1<sup>ra</sup> Edition, Amphora Society publication. P. 79-121

Prawnitz and Poling (2000). Propierties of Gases and Liquids. 4<sup>ta</sup> Edition. Amphora Society publication. P. 368-373

Ronaldo F. Nascimento (1998), influencia del material de alambique en la composición química de aguardiente de caña de azúcar. *Journal of food and technology*. Vol. 7, Issue 6. P. 501-510.

Steiner B.(1968). Alcoholimetría. Editorial GLEM, Buenos Aires (R.A.). P. 19

Yánez A., Michael A (2002). Termodinámica. 4<sup>ta</sup> impresión. Editorial Mc Grow Hill. México. P. 523

Yanus A. Cengel (2004). Termodinámica. 4<sup>ta</sup>impresion. Editorial Mc Graw Hill. México. P. 156-163.

**PAGINAS DE INTERNET:**

[www.alamper.com/quemador.html](http://www.alamper.com/quemador.html). Fecha de consulta: (11/11/05)

[www.sedigas.es/inspectores/especificaciones](http://www.sedigas.es/inspectores/especificaciones). Fecha de consulta: (19/10/05)

[www.fao.org/docrep/X50595/x5059505.htm#leña](http://www.fao.org/docrep/X50595/x5059505.htm#leña). Fecha de consulta: (18/11/05)

[www.krona.srv.br/index.htm](http://www.krona.srv.br/index.htm). Fecha de consulta: (10/12/05)

[www.homedistillers.org](http://www.homedistillers.org). Fecha de consulta: (05/06/05)

[www.coppermoonshinestills.com](http://www.coppermoonshinestills.com). Fecha de consulta: (06/03/06)

<http://labprop.dmt.upm.es/monty/aerorrea.htm>. Fecha de consulta: (22/11/05)

<http://www.fchart.com>. Fecha de consulta: (13/08/05)

[www.imp.mx](http://www.imp.mx). Fecha de consulta: (18/11/05)

# APÉNDICE

**Apéndice 1.-** Tablas de Conversión de unidades.

**ÁNGULO PLANO**

	°	'	"	RADIÁN	rev
1 grado =	1	60	3600	$1.745 \times 10^{-2}$	$2.778 \times 10^{-3}$
1 minuto =	$1.667 \times 10^{-2}$	1	60	$2.909 \times 10^{-4}$	$4.630 \times 10^{-5}$
1 segundo =	$2.778 \times 10^{-4}$	$1.667 \times 10^{-2}$	1	$4.848 \times 10^{-6}$	$7.716 \times 10^{-7}$
1 RADIÁN =	57.30	3438	$2.063 \times 10^5$	1	0.1592
1 revolución =	360	$2.16 \times 10^4$	$1.296 \times 10^6$	6.283	1

**ÁNGULO SÓLIDO**

1 esfera =  $4\pi$  esterradianes = 12.57 esterradianes

**LONGITUD**

	cm	METRO	km	in.	ft	mi
1 centímetro =	1	$10^{-2}$	$10^{-5}$	0.3937	$3.281 \times 10^{-2}$	$6.214 \times 10^{-6}$
1 METRO =	100	1	$10^{-3}$	39.37	3.281	$6.214 \times 10^{-4}$
1 kilómetro =	$10^5$	1000	1	$3.937 \times 10^4$	3281	0.6214
1 pulgada =	2.540	$2.540 \times 10^{-2}$	$2.540 \times 10^{-5}$	1	$8.333 \times 10^{-2}$	$1.578 \times 10^{-5}$
1 pie =	30.48	0.3048	$3.048 \times 10^{-4}$	12	1	$1.894 \times 10^{-4}$
1 milla =	$1.609 \times 10^5$	1609	1.609	$6.336 \times 10^4$	5280	1

1 angström =  $10^{-10}$  m

1 milla náutica = 1852 m

= 1.151 millas = 6076 ft

1 fermi =  $10^{-15}$  m

1 año-luz =  $9.460 \times 10^{12}$  km

1 parsec =  $3.084 \times 10^{13}$  km

1 fathom = 6 ft

1 radio de Bohr =  $5.292 \times 10^{-11}$  m

1 yarda = 3 ft

1 rod = 16.5 ft

1 mil =  $10^{-3}$  in

1 nm =  $10^{-9}$  m

**ÁREA**

	METRO <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup>	in. <sup>2</sup>
1 METRO CUADRADO =	1	$10^4$	10.76	1550
1 centímetro cuadrado =	$10^{-4}$	1	$1.076 \times 10^{-3}$	0.1550
1 pie cuadrado =	$9.290 \times 10^{-2}$	929.0	1	144
1 pulgada cuadrada =	$6.452 \times 10^{-4}$	6.452	$6.944 \times 10^{-3}$	1

1 milla cuadrada =  $2.788 \times 10^7$  ft<sup>2</sup> = 640 acres

1 barnio =  $10^{-28}$  m<sup>2</sup>

1 acre = 43,560 ft<sup>2</sup>

1 hectárea =  $10^4$  m<sup>2</sup> = 2.471 acres

A-10

Fuente: Perry, John H. (1960). Manual del ingeniero químico. Uteha México D.F. volumen II. P. 368

Continuación del Apéndice 1.

Apéndice G A-11

VOLUMEN

	METRO <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	L	ft <sup>3</sup>	in. <sup>3</sup>
1 METRO CÚBICO =	1	10 <sup>6</sup>	1000	35.31	6.102 × 10 <sup>4</sup>
1 centímetro cúbico =	10 <sup>-6</sup>	1	1.000 × 10 <sup>-3</sup>	3.531 × 10 <sup>-5</sup>	6.102 × 10 <sup>-2</sup>
1 litro =	1.000 × 10 <sup>-3</sup>	1000	1	3.531 × 10 <sup>-2</sup>	61.02
1 pie cúbico =	2.832 × 10 <sup>-2</sup>	2.832 × 10 <sup>4</sup>	28.32	1	1728
1 pulgada cúbica =	1.639 × 10 <sup>-5</sup>	16.39	1.639 × 10 <sup>-2</sup>	5.787 × 10 <sup>-4</sup>	1

1 galón fluido U.S. = 4 cuartos fluidos U.S. = 8 pintas U.S. = 128 onzas fluidas U.S. = 231 in.<sup>3</sup>  
 1 galón imperial británico = 277.4 in.<sup>3</sup> = 1.201 galones fluidos U.S.

MASA

	g	KILOGRAMO	slug	u	oz	lb	ton
1 gramo =	1	0.001	6.852 × 10 <sup>-3</sup>	6.022 × 10 <sup>23</sup>	3.527 × 10 <sup>-2</sup>	2.205 × 10 <sup>-5</sup>	1.102 × 10 <sup>-6</sup>
1 KILOGRAMO =	1000	1	6.852 × 10 <sup>-2</sup>	6.022 × 10 <sup>26</sup>	35.27	2.205	1.102 × 10 <sup>-3</sup>
1 slug =	1.459 × 10 <sup>4</sup>	14.59	1	8.786 × 10 <sup>27</sup>	514.8	32.17	1.609 × 10 <sup>-2</sup>
1 u =	1.661 × 10 <sup>-24</sup>	1.661 × 10 <sup>-27</sup>	1.138 × 10 <sup>-28</sup>	1	5.857 × 10 <sup>-26</sup>	3.662 × 10 <sup>-27</sup>	1.830 × 10 <sup>-30</sup>
1 onza =	28.35	2.835 × 10 <sup>-2</sup>	1.943 × 10 <sup>-3</sup>	1.718 × 10 <sup>25</sup>	1	6.250 × 10 <sup>-2</sup>	3.125 × 10 <sup>-5</sup>
1 libra =	453.6	0.4536	3.108 × 10 <sup>-2</sup>	2.732 × 10 <sup>26</sup>	16	1	0.0005
1 ton =	9.072 × 10 <sup>3</sup>	907.2	62.16	5.463 × 10 <sup>22</sup>	3.2 × 10 <sup>4</sup>	2000	1

1 tonelada métrica = 1000 kg  
 Las cantidades en las zonas sombreadas no son unidades de masa pero se usan a menudo como tales. Por ejemplo, cuando escribimos 1 kg "≈" 2.205 lb significa que un kilogramo es una masa que pesa 2.205 libras en condiciones de gravedad estándar (g = 9.80665 m/s<sup>2</sup>).

DENSIDAD

	slug/ft <sup>3</sup>	KILOGRAMO/METRO <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	lb/ft <sup>3</sup>	lb/in. <sup>3</sup>
1 slug por ft <sup>3</sup> =	1	515.4	0.5154	32.17	1.862 × 10 <sup>-2</sup>
1 KILOGRAMO por METRO <sup>3</sup> =	1.940 × 10 <sup>-3</sup>	1	0.001	6.243 × 10 <sup>-2</sup>	3.613 × 10 <sup>-6</sup>
1 gramo por cm <sup>3</sup> =	1.940	1000	1	62.43	3.613 × 10 <sup>-2</sup>
1 libra por ft <sup>3</sup> =	3.108 × 10 <sup>-2</sup>	16.02	1.602 × 10 <sup>-2</sup>	1	5.787 × 10 <sup>-5</sup>
1 libra por in. <sup>3</sup> =	53.71	2.768 × 10 <sup>4</sup>	21.68	1728	1

Las cantidades en las zonas sombreadas son densidades de peso y, como tales, son dimensionalmente diferentes a las densidades de masa. Véase la nota en la tabla de masas.

TIEMPO

	y	d	h	min	SEGUNDO
1 año =	1	365.25	8.766 × 10 <sup>3</sup>	5.259 × 10 <sup>5</sup>	3.156 × 10 <sup>7</sup>
1 día =	2.738 × 10 <sup>-3</sup>	1	24	1440	8.640 × 10 <sup>4</sup>
1 hora =	1.141 × 10 <sup>-4</sup>	4.167 × 10 <sup>-2</sup>	1	60	3600
1 minuto =	1.901 × 10 <sup>-6</sup>	6.944 × 10 <sup>-4</sup>	1.667 × 10 <sup>-2</sup>	1	60
1 SEGUNDO =	3.169 × 10 <sup>-8</sup>	1.157 × 10 <sup>-5</sup>	2.778 × 10 <sup>-4</sup>	1.667 × 10 <sup>-2</sup>	1

Fuente: Perry, John H. (1960). Manual del ingeniero químico. Uteha México D.F. volumen II. P.

Continuación del apéndice 1.

A-12 Factores de conversión

VELOCIDAD

	ft/s	km/h	METROS/SEG	mi/h	cm/s
1 pie por segundo =	1	1.097	0.3048	0.6818	30.48
1 kilómetro por hora =	0.9113	1	0.2778	0.6214	27.78
1 METRO por SEG =	3.281	3.6	1	2.237	100
1 milla por hora =	1.467	1.609	0.4470	1	44.70
1 centímetro por segundo =	$3.281 \times 10^{-2}$	$3.6 \times 10^{-2}$	0.01	$2.237 \times 10^{-2}$	1

1 nudo = 1 milla náutica por hora 1.688 ft/s      1 mi/min = 88.00 ft/s = 60.00 mi/h

FUERZA

	dyne	NEWTON	lb	pdl	gf	kgf
1 dina =	1	$10^{-5}$	$2.248 \times 10^{-6}$	$7.233 \times 10^{-5}$	$1.020 \times 10^{-3}$	$1.020 \times 10^{-6}$
1 NEWTON =	$10^5$	1	0.2248	7.233	102.0	0.1020
1 libra =	$4.448 \times 10^5$	4.448	1	32.17	453.6	0.4536
1 poundal* =	$1.383 \times 10^4$	0.1383	$3.108 \times 10^{-2}$	1	14.10	$1.410 \times 10^{-2}$
1 gramo-fuerza =	980.7	$9.807 \times 10^{-3}$	$2.205 \times 10^{-3}$	$7.093 \times 10^{-2}$	1	0.001
1 kilogramo-fuerza =	$9.807 \times 10^5$	9.807	2.205	70.93	1000	1

\*(Unidad absoluta de fuerza)

Las cantidades en las zonas sombreadas no son unidades de fuerza pero a menudo se usan como tales. Por ejemplo, si escribimos 1 gramo-fuerza = 980.7 dinas, queremos decir que un gramo-masa experimenta una fuerza de 980.7 dinas en condiciones de gravedad estándar ( $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$ ).

ENERGÍA, TRABAJO, CALOR

	Btu	erg	ft·lb	hp·h	JOULE	cal	kW·h	eV	MeV	kg	u
1 unidad térmica británica =	1	$1.055 \times 10^{10}$	777.9	$3.929 \times 10^{-4}$	1055	252.0	$2.930 \times 10^{-4}$	$6.585 \times 10^{21}$	$6.585 \times 10^{15}$	$1.174 \times 10^{-14}$	$7.070 \times 10^{12}$
1 erg =	$9.481 \times 10^{-11}$	1	$7.376 \times 10^{-8}$	$3.725 \times 10^{-14}$	$10^{-7}$	$2.389 \times 10^{-8}$	$2.778 \times 10^{-14}$	$6.242 \times 10^{11}$	$6.242 \times 10^5$	$1.113 \times 10^{-24}$	670.2
1 libra-pie =	$1.285 \times 10^{-3}$	$1.356 \times 10^7$	1	$5.051 \times 10^{-7}$	1.356	0.3238	$3.766 \times 10^{-7}$	$8.464 \times 10^{18}$	$8.464 \times 10^{12}$	$1.509 \times 10^{-17}$	$9.037 \times 10^9$
1 caballo de fuerza-hora =	2545	$2.685 \times 10^{13}$	$1.980 \times 10^6$	1	$2.685 \times 10^6$	$6.413 \times 10^5$	0.7457	$1.676 \times 10^{25}$	$1.676 \times 10^{19}$	$2.988 \times 10^{-11}$	$1.799 \times 10^{16}$
1 JOULE =	$9.481 \times 10^{-4}$	$10^7$	0.7376	$3.725 \times 10^{-7}$	1	0.2389	$2.778 \times 10^{-7}$	$6.242 \times 10^{18}$	$6.242 \times 10^{12}$	$1.113 \times 10^{-13}$	$6.702 \times 10^9$
1 caloría =	$3.969 \times 10^{-3}$	$4.186 \times 10^7$	3.088	$1.560 \times 10^{-6}$	4.186	1	$1.163 \times 10^{-6}$	$2.613 \times 10^{19}$	$2.613 \times 10^{13}$	$4.660 \times 10^{-17}$	$2.806 \times 10^{10}$
1 kilowatt-hora =	3413	$3.6 \times 10^{13}$	$2.655 \times 10^6$	1.341	$3.6 \times 10^6$	$8.600 \times 10^5$	1	$2.247 \times 10^{25}$	$2.247 \times 10^{19}$	$4.007 \times 10^{-11}$	$2.413 \times 10^{16}$
1 electrónvolt =	$1.519 \times 10^{-22}$	$1.602 \times 10^{-12}$	$1.182 \times 10^{-19}$	$5.967 \times 10^{-26}$	$1.602 \times 10^{-19}$	$3.827 \times 10^{-20}$	$4.450 \times 10^{-26}$	1	$10^{-6}$	$1.783 \times 10^{-36}$	$1.074 \times 10^{-9}$
1 millón de electronvolts =	$1.519 \times 10^{-16}$	$1.602 \times 10^{-6}$	$1.182 \times 10^{-13}$	$5.967 \times 10^{-20}$	$1.602 \times 10^{-13}$	$3.827 \times 10^{14}$	$4.450 \times 10^{-20}$	$10^6$	1	$1.783 \times 10^{-30}$	$1.074 \times 10^{-3}$
1 kilogramo =	$8.521 \times 10^{13}$	$8.987 \times 10^{23}$	$6.629 \times 10^{16}$	$3.348 \times 10^{10}$	$8.987 \times 10^{16}$	$2.146 \times 10^{16}$	$2.497 \times 10^{10}$	$5.610 \times 10^{25}$	$5.610 \times 10^{23}$	1	$6.022 \times 10^{26}$
1 unidad unificada de masa atómica =	$1.415 \times 10^{-13}$	$1.492 \times 10^{-3}$	$1.101 \times 10^{-10}$	$5.559 \times 10^{-17}$	$1.492 \times 10^{-10}$	$3.564 \times 10^{-11}$	$4.146 \times 10^{-17}$	$9.32 \times 10^8$	932.0	$1.661 \times 10^{-27}$	1

Las cantidades en las zonas sombreadas no son unidades de energía propiamente pero se incluyen por conveniencia. Proviene de la fórmula de equivalencia masa-energía relativista  $E = mc^2$  y representan la energía equivalente de una masa de un kilogramo o una unidad unificada de masa atómica (u).

Fuente: Perry, John H. (1960). Manual del ingeniero químico. Uteha México D.F. volumen II. P.

Continuación del Apéndice 1

Apéndice G A-13

PRESIÓN

	atm	dina/cm <sup>2</sup>	in de agua	cm Hg	PASCAL	lb/in. <sup>2</sup>	lb/ft <sup>2</sup>
1 atmósfera =	1	1.013 × 10 <sup>6</sup>	406.8	76	1.013 × 10 <sup>5</sup>	14.70	2116
1 dina por cm <sup>2</sup> =	9.869 × 10 <sup>-7</sup>	1	4.015 × 10 <sup>-4</sup>	7.501 × 10 <sup>-3</sup>	0.1	1.405 × 10 <sup>-3</sup>	2.089 × 10 <sup>-3</sup>
1 in de agua <sup>†</sup> a 4°C =	2.458 × 10 <sup>-3</sup>	2491	1	0.1868	249.1	3.613 × 10 <sup>-2</sup>	5.202
1 centímetro de mercurio <sup>†</sup> a 0°C =	1.316 × 10 <sup>-2</sup>	1.333 × 10 <sup>4</sup>	5.353	1	1333	0.1934	27.85
1 PASCAL =	9.869 × 10 <sup>-6</sup>	10	4.015 × 10 <sup>-3</sup>	7.501 × 10 <sup>-4</sup>	1	1.450 × 10 <sup>-4</sup>	2.089 × 10 <sup>-2</sup>
1 libra por in <sup>2</sup> =	6.805 × 10 <sup>-2</sup>	6.895 × 10 <sup>4</sup>	27.68	5.171	6.895 × 10 <sup>3</sup>	1	144
1 libra por ft <sup>2</sup> =	4.725 × 10 <sup>-4</sup>	478.8	0.1922	3.591 × 10 <sup>-2</sup>	47.88	6.944 × 10 <sup>-3</sup>	1

<sup>†</sup> En donde la aceleración de la gravedad tiene el valor estándar 9.80665 m/s<sup>2</sup>.

1 bar = 10<sup>6</sup> dinas/cm<sup>2</sup> = 0.1 MPa

1 milibar = 10<sup>5</sup> dinas/cm<sup>2</sup> = 10<sup>2</sup> Pa

1 torr = 1 milímetro de mercurio

POTENCIA

	Btu/h	ft·lb/s	hp	cal/s	kW	WATT
1 unidad térmica británica por hora =	1	0.2161	3.929 × 10 <sup>-4</sup>	6.998 × 10 <sup>-2</sup>	2.930 × 10 <sup>-4</sup>	0.2930
1 libra-pie por segundo =	4.628	1	1.818 × 10 <sup>-3</sup>	0.3239	1.356 × 10 <sup>-3</sup>	1.356
1 caballo de fuerza =	2545	550	1	178.1	0.7457	745.7
1 caloría por segundo =	14.29	3.088	5.615 × 10 <sup>-3</sup>	1	4.186 × 10 <sup>-3</sup>	4.186
1 kilowatt =	3413	737.6	1.341	238.9	1	1000
1 WATT =	3.413	0.7376	1.341 × 10 <sup>-3</sup>	0.2389	0.001	1

FLUJO MAGNÉTICO

	maxwell	WEBER
1 maxwell =	1	10 <sup>-8</sup>
1 WEBER =	10 <sup>8</sup>	1

CAMPO MAGNÉTICO

	gauss	TESLA	milligauss
1 gauss =	1	10 <sup>-4</sup>	1000
1 TESLA =	10 <sup>4</sup>	1	10 <sup>7</sup>
1 milligauss =	0.001	10 <sup>-7</sup>	1

1 tesla = 1 weber / metro<sup>2</sup>

Fuente: Perry, John H. (1960). Manual del ingeniero químico. Uteha México D.F. volumen II. P. 371

**Apéndice 2.-** Tabla de densidades según el contenido de grados Gay Lussac de las mezclas etanol y agua.

DENSIDAD DE LAS MEZCLAS DE AGUA Y ALCOHOL A + 15°.

Alcohol en volumen grado alcohométrico	Densidad						
0	1.000	25	0.9711	50	0.9348	75	0.8779
1	0.9985	26	0.9700	51	0.9329	76	0.8753
2	0.9970	27	0.9690	52	0.9309	77	0.8726
3	0.9956	28	0.9679	53	0.9289	78	0.8699
4	0.9942	29	0.9668	54	0.9269	79	0.8672
5	0.9829	30	0.9657	55	0.9248	80	0.8645
6	0.9916	31	0.9645	56	0.9227	81	0.8617
7	0.9903	32	0.9633	57	0.9185	82	0.8589
8	0.9891	33	0.9621	58	0.9163	83	0.8560
9	0.9878	34	0.9609	59	0.9206	84	0.8531
10	0.9867	35	0.594	60	0.9141	85	0.8502
11	0.9855	36	0.9581	61	0.9119	86	0.8472
12	0.9844	37	0.9567	62	0.9096	87	0.8442
13	0.9833	38	0.9553	63	0.9073	88	0.8411
14	0.9922	39	0.9538	64	0.9050	89	0.8379
15	0.9812	40	0.9523	65	0.9027	90	0.8346
16	0.9802	41	0.9507	66	0.9004	91	0.8312
17	0.9792	42	0.9491	67	0.8980	92	0.8278
18	0.9782	43	0.9474	68	0.8956	93	0.8242
19	0.9773	44	0.9457	69	0.8932	94	0.8206
20	0.9763	45	0.9440	70	0.8907	95	0.8168
21	0.9753	46	0.9422	71	0.8882	96	0.8086
22	0.9742	47	0.9404	72	0.8857	97	0.8042
23	0.9732	48	0.9386	73	0.8831	98	0.8128
24	0.9722	49	0.9367	74	0.8805	99	0.7996
						100	0.7947

Fuente: Perry, John H. (1960). Manual del ingeniero químico. Uteha México D.F. volumen II. P. 411

**Apéndice 3.-** Poder calorífico del Gas Lp, según las concentraciones comerciales de propano y butano.

**Poder calorífico para gas. L.P.**

Tipo de Gas		Densidad Relativa agua=1		Densidad Relativa aire=1	
Propano %	Butano %	Fase Liquida	BTU/litro	Fase Vapor	BTU/ M <sup>3</sup>
0	100	0.584	27,209.00	2.000	118,265.00
10	90	0.576	26,900.00	1.953	115,445.00
20	80	0.569	26,561.00	1.906	112,219.00
<b>30</b>	<b>70</b>	0.561	26,282.00	1.859	109,439.00
<b>40</b>	<b>60</b>	0.554	25,973.00	1.812	106,331.00
<b>50</b>	<b>50</b>	0.546	25,664.00	1.765	103,409.00
60	40	0.538	25,355.00	1.718	100,477.00
70	30	0.531	25,045.00	1.671	97,351.00
80	20	0.523	24,736.00	1.624	94,403.00
90	10	0.515	24,427.00	1.577	91,447.00
100	0	0.508	24,118.00	1.530	88,305.00

\* porcentajes mas comunes en el gas L.P.

Datos obtenidos de tablas suministradas por la compañía Cova-gas.

**Apéndice 4.-** Composición porcentual de la leña y poder calorífico de la leña según concentración de humedad.

**Composición química porcentual de la leña en función del contenido de humedad, en porcentaje, en peso**

Compuesto químico	Contenido de humedad (% b.h.)		
	0	20	40
Carbono	50,30	40,24	30,18
Hidrógeno	6,20	4,96	3,72
Oxígeno	43,08	34,46	25,85
Nitrógeno	0,04	0,03	0,02
Azufre	0,00	0,00	0,00
Cenizas	0,37	0,31	0,23
Total	100,00	100,00	100,00

Fuente: DINIZ (1981)

**Poder calorífico inferior de la leña seca con 40 a 50% de humedad.**

Especie	Hi (KJ/Kg)	Fuente
Eucalipto	19228	(1)
Pino	20482	(1)
Cedro	18066	(2)
Ciprés	21443	(2)
Encino	19500	(2)
Media	19744	(2)

Fuente:

(1) MITRE (1982)

(2) DINIZ (1981)

Fuente: [www.fao.org/docrep/X50595/x5059505.htm#leña](http://www.fao.org/docrep/X50595/x5059505.htm#leña)