



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

“Trabajo de grado previo a la obtención del Título de Ingeniero Industrial”

**TRABAJO DE GRADUACIÓN**

**“CONSTRUCCIÓN DE UN DESTILADOR PARA LA IMPLEMENTACIÓN  
DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS EN LA FACULTAD  
DE INGENIERÍA”**

**AUTORES:**

MAYRA ALEJANDRA CARRILLO ROBALINO

JHONNY FREDDY QUIGURÍ QUIGURÍ

**DIRECTOR DE TESIS:** Ing. Mario Cabrera.

**RIOBAMBA-ECUADOR**

**2011**

**PÁGINA DE REVISIÓN**

Los miembros del Tribunal de Graduación del proyecto de investigación de título:  
CONSTRUCCIÓN DE UN DESTILADOR PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL  
LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS EN LA FACULTAD DE  
INGENIERÍA, presentado por: Mayra Alejandra Carrillo Robalino y Jhonny Freddy  
Quiguirí Quiguirí, dirigida por: el Ing. Mario Cabrera.

Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de  
investigación con fines de graduación escrito en la cual se ha constatado el  
cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodia en  
la biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la UNACH.

Para constancia de lo expuesto firman:

Ing. Rodrigo Briones  
Presidente

-----

Ing. Mario Cabrera  
Director

-----

Ing. Vicente Soria  
Miembro

-----

### **AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

La responsabilidad de este proyecto de graduación, nos corresponde exclusivamente a: Mayra Alejandra Carrillo Robalino, Jhonny Freddy Quiguirí Quiguirí e Ing. Mario Cabrera director del proyecto; y el patrimonio intelectual del mismo a la Universidad Nacional de Chimborazo.

## **AGRADECIMIENTO**

Nosotros, Mayra Alejandra Carrillo Robalino y Jhonny Freddy Quiguirí Quiguirí, hacemos extensivo un profundo agradecimiento al Ing. Mario Cabrera, director de la tesis; quien con su conocimiento, apoyo y tiempo ha hecho posible que esta idea se vea plasmada y realizada en la culminación de la investigación.

Agradecemos a los Ing. Vicente Soria, asesor, Ing. Rodrigo Briones, miembro del tribunal; por todo su apoyo y consejos aportados para el desarrollo y finalización del trabajo de investigación.

Finalmente agradecemos a todos y cada uno que de una u otra manera nos ayudaron a culminar exitosamente con nuestro trabajo de investigación.

## **DEDICATORIA**

### **“Quien persevera, alcanza...”**

Quiero dedicar este trabajo a mis padres Jorge Gilberto y Flor María por darme la oportunidad de estar en este mundo, por su infinito amor, sacrificio y apoyo en todo momento; por educarme y guiarme conociendo siempre que quien persevera, alcanza.

Dedico además este trabajo a mis hermanas Eulalia y Sonia quienes me han apoyado siempre y a mi sobrina Lesly Alejandra que la quiero como si fuese mi hija.

**Mayra A. Carrillo R.**

## **DEDICATORIA**

### **Querer es poder Solo vencíendote vencerás**

Este trabajo va dedicado a mis padres, Segundo Quiguirí y María Rosa Quiguirí, que son las personas que dedicaron esfuerzo sacrificio y me enseñaron el camino del bien y así poder alcanzar mis metas.

Dedico además a mis hermanos, Jorge quien me apoyo incondicionalmente en todo el trayecto de mi carrera, a mi Tía Isabel que fue un soporte a Maribel Guerrero quien fue un pilar fundamental en mi vida.

**Jhonny F. Quiguirí Q.**

## **ÍNDICE GENERAL**

PORTADA.....	
....i	
PÁGINA DE	
REVISIÓN.....	ii
AUTORÍA DE LA	
INVESTIGACIÓN.....	iii

AGRADECIMIENTO.....	iv
DEDICATORIA.....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE TABLAS.....	xiv
ÍNDICE ANEXOS.....	xv
RESUMEN.....	xvii
SUMMARY.....	xviii

INTRODUCCIÓN.....	1
-------------------	---

## CAPÍTULO I

<b>1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. PROBLEMATIZACIÓN.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3. JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>4</b>
<b>1.4. OBJETIVOS.....</b>	<b>5</b>
1.4.1. Objetivo general.....	5
1.4.2. Objetivos específicos.....	5
<b>1.5. PARTE TEÓRICA.....</b>	<b>6</b>
<b>1.5.1. AGUA.....</b>	<b>6</b>
1.5.1.1. Definición y estructura.....	6
1.5.1.2. Estructura.....	6
1.5.1.3. Propiedades del agua.....	8
1.5.1.4. Características del agua para calderos.....	11
1.5.1.5. Problemas derivados de la utilización del agua en calderos.....	11
<b>1.5.2. ALCOHOL.....</b>	<b>14</b>
1.5.2.1. Definición.....	14
1.5.2.2. Propiedades de los alcoholes.....	16
1.5.2.3. Obtención del alcohol.....	20
<b>1.5.3. ESENCIAS.....</b>	<b>21</b>
1.5.3.1. Definición.....	21
1.5.3.2. Procedencia de las esencias.....	22

1.5.3.3.	Métodos de obtención de esencias.....	25
1.5.4.	<b>EVAPORACIÓN</b> .....	26
1.5.4.1.	Definición.....	26
1.5.4.2.	Teoría cinética.....	26
1.5.4.3.	Factores que influyen en la tasa de evaporación.....	27
1.5.5.	<b>CONDENSACIÓN</b> .....	28
1.5.5.1.	Definición.....	28
1.5.5.2.	Aplicaciones.....	29
1.5.6.	<b>INTERCAMBIADOR DE CALOR</b> .....	29
1.5.6.1.	Definición.....	29
1.5.6.2.	Tipos de intercambiadores de calor.....	30
1.5.7.	<b>DESTILACIÓN</b> .....	33
1.5.7.1.	Definición.....	33
1.5.7.2.	Teoría de la destilación.....	34
1.5.7.3.	Tipos de destilación.....	34
1.5.8.	<b>ACERO</b>	
	<b>INOXIDABLE</b> .....	47
1.5.8.1.	Definición.....	47
1.5.8.2.	Estructura de acero.....	48
1.5.8.3.	Ventajas al usar acero inoxidable.....	49

## CAPÍTULO II

2.	<b>MARCO</b>	
	<b>METODOLÓGICO</b> .....	50
2.1.	<b>METODOLOGÍA</b> .....	50
2.2.	<b>TIPO</b>	<b>DE</b>
	<b>INVESTIGACIÓN</b> .....	50
2.3.	<b>OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES</b> .....	51
2.4.	<b>DISEÑO DEL EVAPORADOR</b> .....	52
2.4.1.	Requerimientos de la cámara de ebullición.....	52
2.4.2.	Cálculo de la altura del cilindro.....	52
2.4.3.	Volumen real de trabajo.....	53
2.5.	<b>CONSTRUCCIÓN DEL DESTILADOR</b> .....	54

2.5.1. Materiales, equipos y EPP.....	
2.5.2. ....	54
2.5.3. Construcción de la cámara de ebullición.....	
2.5.4. ....	56
2.5.5. Construcción de la cámara de condensación o intercambiador de calor...	
2.5.6. ....	57
2.5.7. Construcción y ensamble del soporte.....	58
2.5.8. Construcción y ensamble del tanque de almacenamiento.....	59
2.5.9. Construcción y ensamble de la base móvil del equipo.....	60
2.5.10. Operaciones para la construcción del destilador.....	61
2.5.11. Equipo construido.....	64
2.5.12. Recursos humanos.....	66
<b>2.6. ANÁLISIS DE COSTOS.....</b>	<b>66</b>
2.6.1. Costo de inversión.....	66
2.6.2. Costo de operación.....	67
2.6.3. Costos indirectos.....	67
2.6.4. Costo total.....	68
<b>2.7. PARTE EXPERIMENTAL.....</b>	<b>68</b>
2.7.1. Muestreo.....	68
2.7.2. Formato de prácticas de laboratorio.....	68

### **CAPÍTULO III**

<b>3. RESULTADOS.....</b>	<b>71</b>
<b>3.1. RESULTADOS DE LA PRÁCTICA DE DESTILACIÓN DE AGUA.....</b>	<b>71</b>
3.1.1. Cálculo del caudal.....	71
3.1.2. Calor suministrado por la resistencia.....	72
3.1.3. Balance de masas o rendimiento.....	73

3.1.4. Resultados del análisis de laboratorio del agua cruda y agua blanda.....	74
3.1.5. Eficiencia.....	75
<b>3.2. RESULTADOS DE LA PRÁCTICA DE ALCOHOL.....</b>	<b>79</b>
3.2.1. Cálculo del caudal.....	79
3.2.2. Calor suministrado por la resistencia.....	80
3.2.3. Balance de masas o rendimiento.....	81
3.2.4. Resultados del análisis de laboratorio del jugo de caña fermentado.....	82
3.2.5. Resultados del análisis de laboratorio del condensado obtenido.....	83

## **CAPÍTULO IV**

<b>4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>85</b>
--	-----------

## **CAPÍTULO V**

<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>87</b>
<b>5.1. CONCLUSIONES.....</b>	<b>87</b>
<b>5.2. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>89</b>

## **CAPÍTULO VI**

<b>6. PROPUESTA DE MEJORA.....</b>	<b>90</b>
<b>6.1. TÍTULO DE LA PROPUESTA.....</b>	<b>90</b>
<b>6.2. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>90</b>
0	
<b>6.3. OBJETIVOS.....</b>	<b>91</b>
1	
6.3.1. Objetivo general.....	91
6.3.2. Objetivos específicos.....	91
<b>6.4. DESARROLLO DE LA PROPUESTA.....</b>	<b>92</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>98</b>

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

**FIGURAS**  
**PÁGINAS**

Figura 1.  
Estructura de la molécula de agua.....7

Figura 2.  
Puente de hidrógeno.....7

Figura 3.  
Condensador.....30

Figura 4.  
Intercambiador de Calor.....30

Figura 5.  
Configuraciones de flujo y evolución de temperatura (a,b)..... 31

Figura 6.  
Flujo cruzado (a,b).....32

Figura 7.  
Ejemplos de intercambiadores de casco y tubos.....32

Figura 8.  
Diagrama en el que se muestra la operación destilación tipo simple.....35

Figura 9.  
Estructura de destilación fraccionaria para laboratorio.....36

Figura 10.  
Proceso de destilación de etanol.....37

Figura 11.	
Destilador a nivel industrial.....	37
Figura 12.	
Diagrama de Hausbrand.....	38
Figura 13.	
Componentes generales de una torre de vacío.....	40
Figura 14.	
Equipo utilizado en la destilación centrífuga molecular.....	41
Figura 15.	
Diagrama de proceso de la destilación destructiva.....	41
Figura 16.	
Diagrama de flujo simplificado para proceso de destilación extractiva.....	43
Figura 17.	
Diagrama de flujo de la destilación por membrana.....	45
Figura 18.	
Columna de destilación por lotes con rectificación.....	45
Figura 19.	
Diagrama de destilación reactiva.....	47
Figura 20.	
Bobinas de acero inoxidable corrugado.....	48

Figura 21.	
Cilindro de almacenamiento de agua.....	53
Figura 22.	
Cilindro del caldero.....	57
Figura 23.	
Estructura del caldero.....	57
Figura 24.	
Estructura interna del intercambiador.....	58
Figura 25.	
Estructura del intercambiador de calor.....	58
Figura 26.	
Soporte y panel de control.....	59
Figura 27.	
Tanque de almacenamiento y bomba centrífuga.....	60
Figura 28.	
Diagrama de flujo del proceso de construcción del destilador.....	62
Figura 29.	
Diagrama de operaciones de construcción del destilador.....	64
Figura 30.	
Equipo construido (DESTILADOR).....	64
Figura 31.	
Panel de control.....	65
Figura 32.	
Resultado del análisis del agua.....	75

Figura 33.	
Resultado del análisis del jugo de caña fermentado.....	83
Figura 34.	
Resultado del análisis del condensado.....	84
Figura 35.	
Medidor de nivel en flotante.....	92
Figura 36.	
Flotador magnético.....	93
Figura 37.	
Sistema ultrasónico de medición de nivel.....	94
Figura 38.	
Esquema básico del medidor de nivel capacitivo.....	95
Figura 39.	
Relé de contacto.....	95
Figura 40.	
Electrodos de cobre.....	96
Figura 41.	
Bomba centrífuga.....	96

## ÍNDICE DE TABLAS

### TABLAS PÁGINAS

Tabla 1.	
Especificaciones del agua de alimentación para calderos.....	10
Tabla 2.	
Especificaciones del agua para el interior de calderos.....	11
Tabla 3.	
Clasificación de alcoholes por repetición en la misma molécula.....	16
Tabla 4.	
Constantes físicas de algunos alcoholes.....	19
Tabla 5.	
Listado de varios aceites esenciales.....	23
Tabla 6.	
Operacionalización de variables.....	52
Tabla 7.	
Costo de inversión.....	66
Tabla 8.	
Costo de operación.....	67
Tabla 9.	

Costos indirectos.....	67
Tabla 10.	
Resultados de la prueba del agua cruda y agua blanda.....	74
Tabla 11.	
Resultados de la prueba jugo de caña fermentado.....	83
Tabla 12.	
Resultados del análisis del condensado.....	84

## ÍNDICE DE ANEXOS

### ANEXOS PÁGINAS

ANEXO 1.	
Diseño de un destilador.....	xix
ANEXO 2.	
Procedimiento de recolección de muestra.....	xx
ANEXO 3.	
Resultados del análisis laboratorio del agua cruda.....	xxi
ANEXO 4.	
Resultados del análisis laboratorio del agua blanda.....	xxii

ANEXO 5.	
Constantes termodinámicas del vapor de agua húmedo.....	xxiii
ANEXO 6.	
Norma INEN 2015 Bebidas Alcohólicas Control de Añejamiento.....	xxiv
ANEXO 7.	
Norma INEN 1837 Bebidas Alcohólicas Licores.....	xxv
ANEXO 8.	
Norma INEN 347 Bebidas Alcohólicas Determinación de Metanol.....	xxvi
ANEXO 9.	
Resultados del análisis laboratorio del jugo de caña fermentado.....	xxvii
ANEXO 10.	
Resultados del análisis de laboratorio del condensado obtenido.....	xxviii
ANEXO 11.	
Manual de prácticas de laboratorio del destilador.....	xxix
ANEXO 12.	
Manual de prácticas de operación y mantenimiento.....	xxx
ANEXO 13.	
Carta de compromiso de donación.....	xxxi
ANEXO 14.	
Garantía del equipo.....	xxxii

## **RESUMEN**

Al contar con un destilador en el laboratorio de Operaciones Unitarias, para los docentes se facilitará el método de enseñanza, ya que los estudiantes podrán manipular el destilador que consta de dos procesos unitarios en un solo equipo como son: evaporación y transferencia de calor.

Por ello, surgió la gran necesidad de contar con un destilador en el laboratorio, ya que es indispensable que como estudiantes manejemos y experimentemos con el equipo, los diferentes procesos de destilación, que se realizan y son utilizados en las industrias;

conociendo su estructura, funcionamiento, variables que intervienen dentro del proceso, mantenimiento que se debe realizar al equipo, etc.

El equipo básicamente sirve para realizar una destilación simple, que es una operación unitaria muy utilizada para llevar a cabo separaciones parciales de mezclas con componentes volátiles. Esta operación muestra la importancia de explotar las diferentes propiedades de los componentes que forman una mezcla, ya que de manera sencilla se pueden separar sin tener que recurrir a métodos químicos o físicos más complicados.

Se propone para mejorar el funcionamiento del equipo, dotar en un futuro de un sistema conductivo de nivel, el mismo que sirve para retroalimentar el fluido al caldero automáticamente, una vez haya llegado el fluido al nivel mínimo, el sistema iniciará su funcionamiento para llenar nuevamente el caldero hasta su nivel máximo. La propuesta además tiene el objetivo de incrementar un variador de frecuencia para controlar el caudal de recirculación del tanque de almacenamiento que va hacia el intercambiador, en lugar de la llave de paso con la que cuenta actualmente.

## **SUMMARY**

When having a distiller in the unitary operations lab, for professors it will be easier to use a teaching method, since the students will be able to handle the distiller which consists of two unitary processes in a unique equipment like: evaporation and heat transference.

For this reason, it was very important to have a distiller in the laboratory, since it is very fundamental for us as students we can handle and experience with the equipment, the different distillation processes done are used in industries, after knowing their structure, working, variables intervening in the process, equipment maintenance, etc.

This equipment is for performing simple distillation processes, which is a unitary operation very commonly used for carrying out partial mixture separations with volatile components. This operation shows the importance of exploiting the different properties of components making up a mixture, since they can be separated in a simple way without the need of using other more complicated chemical or physical methods.

It is proposed in order to improve the working of the equipment, to endow it with a level conducting system, this one is used to automatically feedback the fluid to the boiler, once the fluid reaches the minimum level, the system will start its working in order to fill the boiler again until it reaches its maximum level. The proposal also has the objective of increasing a frequency varying system for controlling the re circulation caudal from the storage tank going to the interchanger instead of the pass faucet which it has at present.

## **INTRODUCCIÓN**

La destilación simple es una operación en la cual se produce la vaporización de un material por la aplicación de calor; el método es empleado en la industria de capacidad moderada y pequeña, para llevar a cabo separaciones parciales de los componentes más volátiles de mezclas de líquidos miscibles.

Normalmente, la mezcla líquida es cargada en lotes a un recipiente y sometida a ebullición. Los vapores que se desprenden se eliminan continuamente, se condensan y se recolectan sin permitir que tenga lugar ninguna condensación parcial ni retorno al recipiente en donde se lleva a cabo el calentamiento y ebullición de la mezcla. La primera porción del destilado será la más rica en el componente más volátil y conforme continúa la destilación, el producto evaporado se va empobreciendo.

Por lo tanto, el destilado puede recolectarse en varios lotes separados, llamados fracciones, obteniéndose una serie de productos destilados de diferente grado de pureza. En éste sistema, si una mezcla que contiene 25% mol de alcohol etílico en agua se carga en el recipiente hervidor de un sistema de destilación simple intermitente y se calienta, la mezcla empezará a ebullición a una temperatura de 82.5 °C. A ésta temperatura, la composición del vapor en equilibrio con el líquido es de 55% mol de alcohol etílico en agua.

Conforme la vaporización transcurre, se separan y condensan los vapores y la cantidad del líquido en el recipiente va disminuyendo progresivamente, al igual que el contenido del componente más volátil en el líquido y el vapor, y la temperatura de ebullición del líquido en el recipiente va aumentando.

El aparato utilizado para la destilación simple en el laboratorio es el alambique, consta de un recipiente donde se almacena la mezcla a la que se le aplica calor, un condensador donde se enfrían los vapores generados, llevándolos de nuevo al estado líquido y un recipiente donde se almacena el líquido concentrado.

Normalmente en la industria esta operación se realiza por lotes cargándose a un recipiente y sometiéndose a ebullición. Los vapores que se desprenden se eliminan continuamente, se condensan y se recolectan.

Al contar con un destilador en el laboratorio de operaciones unitarias, dotado con todos los elementos adecuados y óptimos con los cuales no cuenta al momento la Facultad de Ingeniería, se facilitará la comprensión y entendimiento de ciertas cátedras como Operaciones Unitarias, Mantenimiento Industrial, Procesos Industriales etc., con lo cual los estudiantes de las escuelas de Ingeniería Industrial, Agroindustrial y Ambiental podrán ser los beneficiados directos de este equipo.

## **CAPÍTULO I**

### **7. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

#### **7.1. PROBLEMATIZACIÓN**

La problemática principal es la falta de conocimiento de esta importante operación unitaria como es la destilación por parte de los estudiantes, ya que este proceso debería estar incluido en las temáticas impartidas en la cátedra de Operaciones Unitarias de las carreras de Ingeniería Industrial, Agroindustrial y Ambiental de la Facultad de Ingeniería.

Por esta razón hemos decidido aportar con este equipo, para que los estudiantes que están cursando los diferentes años y semestres de las diversas carreras, puedan adquirir conocimientos tanto teóricos como prácticos del proceso de destilación; siendo

importante este conocimiento debido a que en las industrias es muy utilizado la destilación en diversos procesos, y como profesionales poder desempeñarnos con mayor facilidad.

## **7.2. IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

La Universidad Nacional de Chimborazo, por más de una década, ha venido capacitando y preparando a la juventud para que mediante una carrera superior puedan desempeñarse y desenvolverse en la vida laboral de una manera eficiente y competitiva, por ello es necesario mantener y seguirse superando en la práctica mediante la utilización de equipos que ayudarán al aprendizaje ampliando así los conocimientos teóricos.

Conocer el proceso de destilación es importante como profesionales, ya que se emplea en numerosas industrias, desde la industria petroquímica a la farmacéutica con el fin de obtener sustancias puras; en la industria del petróleo, siendo ésta una mezcla muy compleja de componentes químicos de estructuras, pesos moleculares, puntos de ebullición, etc., muy diversos; todos los procesos de separación, incluida la isomerización, el cracking térmico catalítico, la alquilación, etc., se realizan con sistemas de destilación fraccionada a presión normal reducida.

En la industria de síntesis química, ya sea de materias primas o productos finos (química fina), se emplea la destilación fraccionada a presión normal, reducida, azeotrópica, etc., para lograr los distintos niveles de calidad de los productos, requeridos por los distintos mercados de aplicación. Procesos químicos tales como, la esterificación, la hidrogenación y oxigenación catalítica, la alquilación y la acilación de Friedel-Crefts, la halogenación fotoquímica, etc., requieren de operaciones de destilación para purificar los productos de síntesis.

En la industria farmacéutica, los aceites esenciales tienen propiedades medicinales y fueron utilizados desde la antigüedad para curar las enfermedades. La ciencia moderna los procesa para obtener drogas o remedios específicos para prevenir o curar afecciones tanto del ser humano como de animales. En base a sus propiedades son ampliamente

utilizados para el aparato digestivo, respiratorio, nervioso y circulatorio; siendo éstos obtenidos mediante el proceso de destilación.

Por este motivo, al obtener conocimientos básicos en la universidad, se nos facilitará el desarrollarnos profesionalmente en industrias que utilicen este proceso, al contar con un destilador en el laboratorio de operaciones unitarias se realizarán diversas pruebas como la destilación de infinidad de esencias, destilación de agua y destilación de alcohol.

Este equipo dotado con todos los elementos adecuados y óptimos con los cuales no cuenta al momento la Facultad de Ingeniería, podrá facilitar la comprensión y entendimiento de ciertas cátedras como Operaciones Unitarias, Mantenimiento Industrial, Procesos Industriales, etc., con lo cual los estudiantes de las Escuelas de Ingeniería Industrial, Agroindustrial y Ambiental podrán ser los beneficiados directos de este equipo.

### **7.3. JUSTIFICACIÓN**

La elaboración del destilador, es el tema fundamental de este estudio, así como equipos para la evaporación, la transferencia de calor, el uso de estos equipos en la industria y el uso de manuales para el manejo de equipos prácticos para su utilización en los laboratorios.

La destilación se usa para separar sustancias volátiles, condensarlas y obtener una sustancia pura, en las industrias éste proceso se lo utiliza para destilar alcohol, agua y diversas esencias.

La cátedra de Operaciones Unitarias, exige un fundamento teórico, el cual está sustentado en libros y enciclopedias existentes, pero se requiere también que contenga una base y fundamentación práctica, las cuales deberían ser impartidas desde un laboratorio que cuente con equipos que se utilizan en las industrias; ya que éstas han ido evolucionando con los avances técnicos y científicos. Por ello surge la necesidad de capacitar a los estudiantes con métodos prácticos y con amplios conocimientos de la maquinaria utilizada en la industria.

La causa esencial de este estudio es implementar este equipo en el laboratorio de Operaciones Unitarias, con el fin de que los estudiantes de las diferentes carreras adquieran conocimientos básicos sobre la destilación, tanto en lo teórico como en lo práctico, por lo que al contar con éste equipo ayudará a la capacitación permanente de los estudiantes, para que en el futuro puedan desarrollarse profesionalmente.

## **7.4. OBJETIVOS**

### **7.4.1. Objetivo general**

- Construir un destilador para la implementación del laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería.

### **7.4.2. Objetivos específicos**

- Adquirir conocimientos y bases fundamentales, técnicas y estructuradas para la fundamentación teórica del destilador.
- Diseñar el tanque de destilación.
- Seleccionar los materiales adecuados y necesarios para la construcción del destilador.
- Construir el destilador y realizar pruebas, para calibrar desperfectos.
- Elaborar un manual para la realización de prácticas de laboratorio.
- Elaborar un manual de utilización, manejo, y mantenimiento del destilador.

## **7.5. PARTE TEÓRICA**

### **7.5.1. AGUA<sup>1</sup>**

---

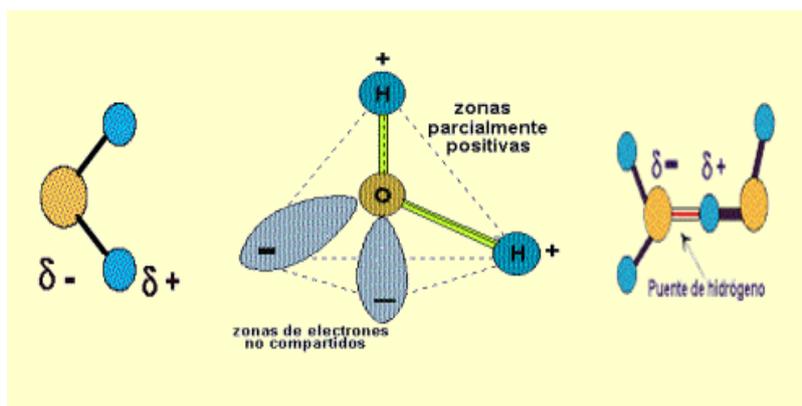
<sup>1</sup> <http://www.aula21.net/Nutriweb/agua.htm>

### 7.5.1.1. Definición y estructura

El agua es un componente de nuestra naturaleza que ha estado presente en la Tierra desde hace más de 3.000 millones de años, ocupando tres cuartas partes de la superficie del planeta. Su naturaleza se compone de tres átomos, dos de oxígeno que unidos entre sí forman una molécula de agua,  $H_2O$ , la unidad mínima en que ésta se puede encontrar. La forma en que estas moléculas se unen entre sí determinará la forma en que encontramos el agua en nuestro entorno; como líquidos, en lluvias, ríos, océanos, camanchaca, etc., como sólidos en témpanos y nieves o como gas en las nubes.

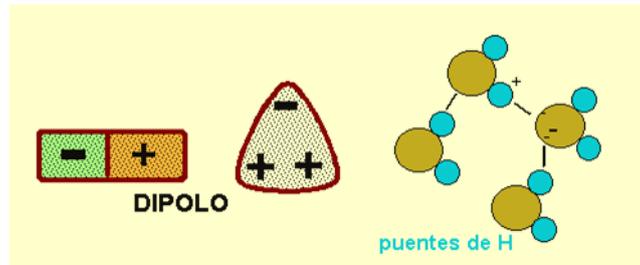
### 7.5.1.2. Estructura

La molécula de agua está formada por dos átomos de H unidos a un átomo de O por medio de dos enlaces covalentes. El ángulo entre los enlaces H-O-H es de  $104'5''$ . El oxígeno es más electronegativo que el hidrógeno y atrae con más fuerza a los electrones de cada enlace.



**Figura 1.** Estructura de la molécula de agua

El resultado es que la molécula de agua aunque tiene una carga total neutra (igual número de protones que de electrones), presenta una distribución asimétrica de sus electrones, lo que la convierte en una molécula polar, alrededor del oxígeno se concentra una densidad de carga negativa, mientras que los núcleos de hidrógeno quedan parcialmente desprovistos de sus electrones y manifiestan, por tanto, una densidad de carga positiva.



**Figura 2.** Puente de hidrógeno

Por ello se dan interacciones dipolo-dipolo entre las propias moléculas de agua, formándose enlaces por puentes de hidrógeno, la carga parcial negativa del oxígeno de una molécula ejerce atracción electrostática sobre las cargas parciales positivas de los átomos de hidrógeno de otras moléculas adyacentes.

Aunque son uniones débiles, el hecho de que alrededor de cada molécula de agua se dispongan otras cuatro moléculas unidas por puentes de hidrógeno permite que se forme en el agua (líquida o sólida) una estructura de tipo reticular, responsable en gran parte de su comportamiento anómalo y de la peculiaridad de sus propiedades fisicoquímicas.

### 7.5.1.3. Propiedades del agua

#### a. Propiedades físicas

- Estado físico: sólida, líquida y gaseosa.
- Color: incolora.
- Sabor: insípida.
- Olor: inodoro.
- Densidad: 1 g./c.c. a 4°C.
- Punto de congelación: 0°C.
- Punto de ebullición: 100°C.
- Presión crítica: 217,5 atm.
- Temperatura crítica: 374°C

Las propiedades físicas del agua se atribuyen principalmente a los enlaces por puente de hidrógeno, los cuales se presentan en mayor número en el agua sólida,

en la red cristalina cada átomo de la molécula de agua está rodeado tetraédricamente por cuatro átomos de hidrógeno de otras tantas moléculas de agua y así sucesivamente es como se conforma su estructura.

Cuando el agua sólida (hielo) se funde la estructura tetraédrica se destruye y la densidad del agua líquida es mayor que la del agua sólida debido a que sus moléculas quedan más cerca entre sí, pero sigue habiendo enlaces por puente de hidrógeno entre las moléculas del agua líquida.

Cuando se calienta agua sólida, que se encuentra por debajo de la temperatura de fusión, a medida que se incrementa la temperatura por encima de la temperatura de fusión se debilita el enlace por puente de hidrógeno y la densidad aumenta más hasta llegar a un valor máximo a la temperatura de 3.98°C y una presión de una atmósfera. A temperaturas mayores de 3.98 °C la densidad del agua líquida disminuye con el aumento de la temperatura de la misma manera que ocurre con los otros líquidos.

## **b. Propiedades químicas**

- *Reacciona con los óxidos ácidos.*- los anhídridos u óxidos ácidos reaccionan con el agua y forman ácidos oxácidos.
- *Reacciona con los óxidos básicos.*- los óxidos de los metales u óxidos básicos reaccionan con el agua para formar hidróxidos. Muchos óxidos no se disuelven en el agua, pero los óxidos de los metales activos se combinan con gran facilidad.
- *Reacciona con los metales.*- algunos metales descomponen el agua en frío y otros lo hacían a temperatura elevada.
- *Reacciona con los no metales.*- el agua reacciona con los no metales, sobre todo con los halógenos, por ejemplo: haciendo pasar carbón al rojo sobre el agua se descompone y se forma una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno (gas de agua).
- *Se une en las sales formando hidratos.*- el agua forma combinaciones complejas con algunas sales, denominándose hidratos.

En algunos casos los hidratos pierden agua de cristalización cambiando de aspecto, y se dice que son eflorescentes, como le sucede al sulfato cúprico, que cuando está hidratado es de color azul, pero por pérdida de agua se transforma en sulfato cúprico anhidro de color.

El agua como compuesto químico, se piensa habitualmente que el agua natural que conocemos es un compuesto químico de fórmula H<sub>2</sub>O, pero no es así, debido a su gran capacidad disolvente toda el agua que se encuentra en la naturaleza contiene diferentes cantidades de diversas sustancias en solución y hasta en suspensión, lo que corresponde a una mezcla.

El agua químicamente pura es un compuesto de fórmula molecular H<sub>2</sub>O. Como el átomo de oxígeno tiene sólo 2 electrones no apareados, para explicar la formación de la molécula H<sub>2</sub>O se considera que de la hibridación de los orbitales atómicos 2s y 2p resulta la formación de 2 orbitales híbridos sp<sup>3</sup>.

El traslape de cada uno de los 2 orbitales atómicos híbridos con el orbital 1s<sup>1</sup> de un átomo de hidrógeno se forman dos enlaces covalentes que generan la formación de la molécula H<sub>2</sub>O, y se orientan los 2 orbitales sp<sup>3</sup> hacia los vértices de un tetraedro triangular regular y los otros vértices son ocupados por los pares de electrones no compartidos del oxígeno.

#### 7.5.1.4. Características del agua en calderos<sup>2</sup>

##### a. Agua para alimentación

A continuación se presenta la Tabla 1, en la que se encuentra varios parámetros que son los adecuados para los calderos en su alimentación:

Presión máxima de servicio en bar	≤ 0,5	> 0,5
Aspecto visual	Transparente, sin color ni sedimentos	
Dureza en mg/l de CO <sub>3</sub> Ca	≤ 10	≤ 5
Oxígeno disuelto (O <sub>2</sub> ) en mg/l	--	≤ 0,2

<sup>2</sup> [http://www.calderasvapor.com/agua\\_calderas.htm](http://www.calderasvapor.com/agua_calderas.htm)

PH a 20°C	8 a 9	8 a 9
CO <sub>2</sub> en forma de CO <sub>3</sub> H-, en mg/l	≤ 25	≤ 25
Aceites y grasas en mg/l	≤ 3	≤ 1
Materias orgánicas valoradas en mg/l de Mn O <sub>4</sub> K consumido (1)	≤ 10	≤ 10

(1) En el caso de alta concentración de materias orgánicas no oxidables con Mn O<sub>4</sub> K y si oxidables con CrO<sub>3</sub> K<sub>2</sub> se consultará a un especialista.

**Tabla 1.** Especificaciones del agua de alimentación para calderos.

**b. Agua para el interior de calderos**

En la Tabla 2, se presenta características del agua a ser utilizada en el interior de calderos:

Presión máxima de servicio en bar		≤ 0,5	0,5 < p ≤ 13	> 13
Salinidad total en mg/l	Vaporización media			
	≤ 40Kg/m <sup>2</sup>	≤ 6000	≤ 6000	≤ 4000
	> 40 Kg/m <sup>2</sup>	≤ 5000	≤ 5000	≤ 3000
Sólidos en suspensión, en mg/l		≤ 300	≤ 300	≤ 250
Alcalinidad total, en mg/l CO <sub>3</sub>		≤ 1000	≤ 800	≤ 600
pH a 20 °C		10,5 a 12,5	10 a 12	10 a 12
Fosfatos, en mg/l P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		≤ 30	≤ 25	≤ 20
Silice, en mg/l Si O <sub>2</sub> (1)		≤ 250	≤ 200	≤ 150 (2)

(1) Las concentraciones de Si O<sub>2</sub> en el agua de la caldera guardarán la relación:

$$\frac{\text{Si O}_2 \text{ (mg/l)}}{m} < 12,5$$

$$m \text{ (m mg/l)}$$

(2) En aquellos casos en que existe un sobrecalentado, se limitará a 100 mg/l para p < 20 bar y a 25 mg/l para presiones superiores.

**Tabla 2.** Especificaciones del agua para el interior de calderos.

### 7.5.1.5. Problemas derivados de la utilización del agua en calderas<sup>3</sup>

Los problemas más frecuentes presentados en calderas pueden dividirse en dos grandes grupos:

- Problemas de corrosión.
- Problemas de incrustación.

Aunque menos frecuente, suelen presentarse ocasionalmente:

- Problemas de ensuciamiento y/o contaminación.

#### a. **Corrosión**

Para que esta aparezca, es necesario que exista presencia de agua en forma líquida, el vapor seco con presencia de oxígeno, no es corrosivo, pero los condensados formados en un sistema de esta naturaleza son muy corrosivos.

En las líneas de vapor y condensado, se produce el ataque corrosivo más intenso en las zonas donde se acumula agua condensada. La corrosión que produce el oxígeno, suele ser severa, debido a la entrada de aire al sistema, a bajo valor de pH, el bióxido de carbono abarca por si mismo los metales del sistema y acelera la velocidad de la corrosión del oxígeno disuelto cuando se encuentra presente en el oxígeno.

El oxígeno disuelto ataca las tuberías de acero al carbono formando montículos o tubérculos, bajo los cuales se encuentra una cavidad o celda de corrosión activa: esto suele tener una coloración negra, formada por un óxido ferroso-férrico hidratado.

---

<sup>3</sup>[http://www.calderasvapor.com/agua\\_calderas.htm](http://www.calderasvapor.com/agua_calderas.htm)

Otra forma frecuente de corrosión, suele ser por una reacción electroquímica, en la que una corriente circula debido a una diferencia de potencial existente en la superficie metálica. Los metales se disuelven en el área de más bajo potencial, para dar iones y liberar electrones.

**b. Incrustación**

La formación de incrustaciones en el interior de las calderas suelen verse con mayor frecuencia que lo estimado conveniente.

El origen de las mismas está dado por las sales presentes en las aguas de aporte a los generadores de vapor, las incrustaciones formadas son inconvenientes debido a que poseen una conductividad térmica muy baja y se forman con mucha rapidez en los puntos de mayor transferencia de temperatura.

Por esto, las calderas incrustadas requieren un mayor gradiente térmico entre el agua y la pared metálica que las calderas con las paredes limpias.

Otro tema importante que debe ser considerado, es la falla de los tubos generado por sobrecalentamientos debido a la presencia de depósitos, lo que dada su naturaleza, aíslan el metal del agua que los rodea pudiendo así sobrevenir desgarros o roturas en los tubos de la unidad con los perjuicios que ello ocasiona.

Las sustancias formadoras de incrustaciones son principalmente el carbonato de calcio, hidróxido de magnesio, sulfato de calcio y sílice, esto se debe a la baja solubilidad que presentan estas sales y algunas de ellas como es el caso del sulfato de calcio, decrece con el aumento de la temperatura. Estas incrustaciones forman depósitos duros muy adherentes, difíciles de remover, a continuación se detalla varias causas más frecuentes de este fenómeno:

- Excesiva concentración de sales en el interior de la unidad.
- El vapor o condensado tienen algún tipo de contaminación.
- Transporte de productos de corrosión a zonas favorables para su precipitación.

- Aplicación inapropiada de productos químicos.

**c. Ensuciamiento por contaminación**

Se consideran en estos rubros como contaminantes, distintas grasas, aceites y algunos hidrocarburos, ya que este tipo de contaminación son las más frecuentes vistas en la industria.

Dependiendo de la cantidad y característica de los contaminantes existentes en el agua de aporte a caldera, la misma generará en su interior depósitos, formación de espuma con su consecuente arrastre de agua concentrada de caldera a la línea de vapor y condensado, siendo la misma causante de la formación de incrustaciones y depósitos en la sección post-caldera.

La formación de espuma, suele ocurrir por dos mecanismos, uno de ellos es el aumento del tenor de sólidos disueltos en el interior de la unidad, los que sobrepasan los límites aceptados de trabajo, la presencia de algunos tipos de grasas y/o aceites (como ácidos orgánicos) producen una saponificación de las mismas dada la alcalinidad, temperatura y presión existentes en el interior de la caldera.

La contaminación por hidrocarburos agrega a lo visto la formación de un film aislante dificultando la transferencia térmica entre los tubos y el agua del interior de la unidad, agravándose esto con las características adherentes de este film que facilita y promueve la formación de incrustaciones y la formación de corrosión bajo depósito, proceso que generalmente sigue al de formación de depósitos sobre las partes metálicas de una caldera.

Luego de un tiempo, las características físicas del film formado cambian debido a la acción de la temperatura que reciben a través de las paredes metálicas del sistema, lo que hace que el mismo sufra un endurecimiento y "coquificación", siendo este difícil de remover por procedimientos químicos simples.

Por todas estas consideraciones, se ve como método más económico y lógico de mantenimiento de calderas, efectuar sobre el agua de aporte a las mismas los procedimientos preventivos que la misma requiera, evitando así costos de

mantenimiento innecesarios y paradas imprevistas en plena etapa de producción con los costos de lucro cesantes que agravan la misma,

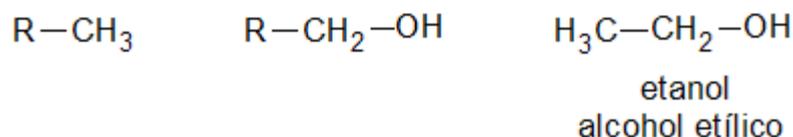
## 7.5.2. ALCOHOL

### 7.5.2.1. Definición<sup>4</sup>

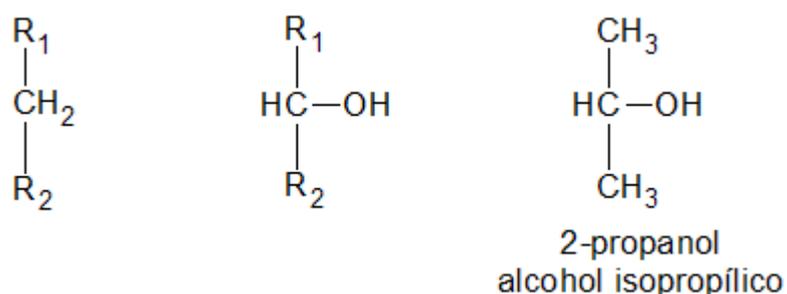
El alcohol o etanol es un producto químico obtenido a partir de la fermentación de los azúcares que se encuentran en los productos vegetales, tales como cereales, remolacha, caña de azúcar, sorgo o biomasa. Estos azúcares están combinados en forma de sacarosa, almidón, hemicelulosa y celulosa.

Los alcoholes pueden ser primarios, secundarios o terciarios, en función del número de átomos de hidrógeno sustituidos en el átomo de carbono al que se encuentran enlazado el grupo hidroxilo.

- a. **Alcoholes primarios.**- un alcohol es primario, si el átomo de hidrogeno (H) sustituido por el grupo oxidrilo (-OH) pertenece a un carbón (C) primario:



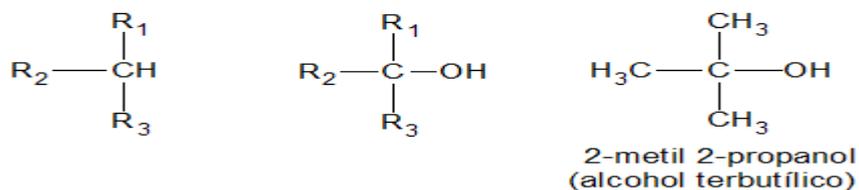
- b. **Alcoholes secundarios.**- un alcohol es secundario, si el átomo de hidrogeno (H) sustituido por el grupo oxidrilo (-OH) pertenece a un carbón (C) secundario:



---

<sup>4</sup> <http://www.textoscientificos.com/quimica/alcoholes>

- c. **Alcoholes terciarios.**- un alcohol es terciario, si el átomo de hidrogeno (H) sustituido por el grupo oxidrilo (-OH) pertenece a un carbón (C) terciario:



La función alcohol puede repetirse en la misma molécula, resultando monoles, o alcoholes monovalentes; dioles, o alcoholes bivalentes; trioles, o alcoholes trivalentes, etc.

Fórmula	Nombre	Clasificación
$  \begin{array}{c} H_2C - OH \\   \\ CH_2 \\   \\ CH_3 \end{array}  $	1-propanol	monol
$  \begin{array}{c} H_2C - OH \\   \\ HC - OH \\   \\ CH_3 \end{array}  $	1,2-propanodiol (propilen glicol)	diol
$  \begin{array}{c} H_2C - OH \\   \\ HC - OH \\   \\ H_2C - OH \end{array}  $	1,2,3-propanotriol (glicerina)	triol

**Tabla 3.** Clasificación de alcoholes por repetición en la misma molécula

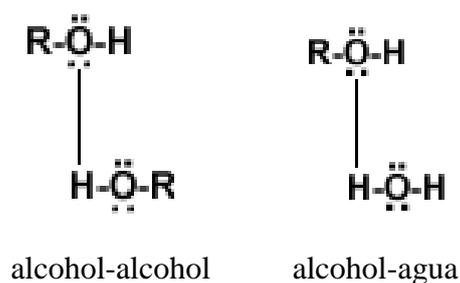
### 7.5.2.2. Propiedades de los alcoholes<sup>5</sup>

- a. **Propiedades físicas.-** las propiedades físicas de un alcohol se basan principalmente en su estructura, está compuesto por un alcano y agua. Contiene un grupo hidrofóbico (sin afinidad por el agua) del tipo de un alcano, y un grupo hidroxilo que es hidrófilo (con afinidad por el agua), similar al agua. De estas dos unidades estructurales, el grupo –OH da a los alcoholes sus propiedades físicas características, y el alquilo es el que las modifica, dependiendo de su tamaño y forma.

El grupo –OH es muy polar y, lo que es más importante, es capaz de establecer puentes de hidrógeno: con sus moléculas compañeras o con otras moléculas neutras.

- *Solubilidad:*

*Puentes de hidrógeno.-* la formación de puentes de hidrógeno permite la asociación entre las moléculas de alcohol. Los puentes de hidrógeno se forman cuando los oxígenos unidos al hidrógeno en los alcoholes forman uniones entre sus moléculas y las del agua. Esto explica la solubilidad del metanol, etanol, 1-propanol, 2-propanol y 2 metil-2-propanol.

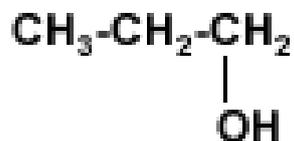


A partir de 4 carbonos en la cadena de un alcohol, su solubilidad disminuye rápidamente en agua, porque el grupo hidroxilo (–OH), polar, constituye una parte relativamente pequeña en comparación con la porción

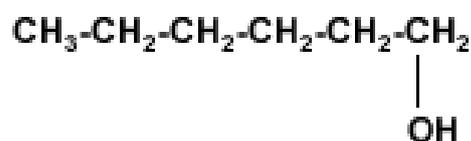
---

<sup>5</sup> [http://www.salonhogar.net/quimica/nomenclatura\\_quimica/Propiedades\\_alcoholes.htm](http://www.salonhogar.net/quimica/nomenclatura_quimica/Propiedades_alcoholes.htm)

hidrocarburo. A partir del hexanol son solubles solamente en solventes orgánicos.

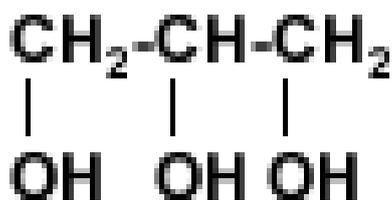


1 propanol



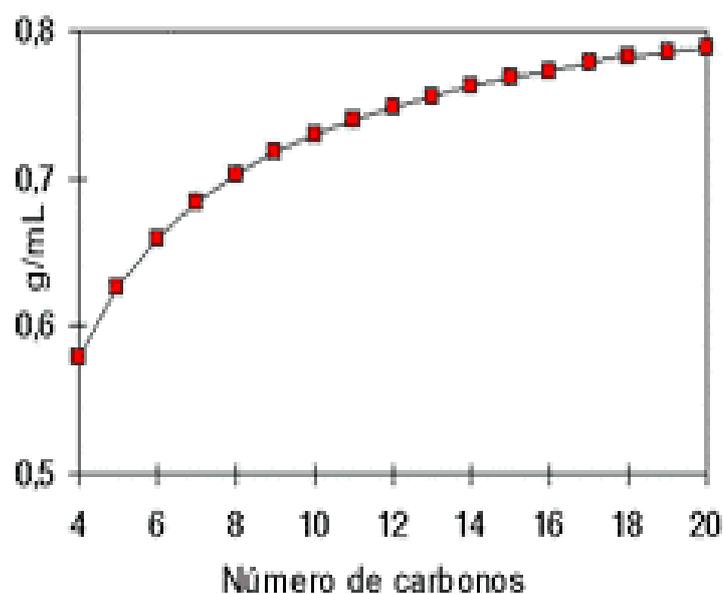
Hexanol

Existen alcoholes con múltiples moléculas de OH (polihidroxilados) que poseen mayor superficie para formar puentes de hidrógeno, lo que permiten que sean bastante solubles en agua.

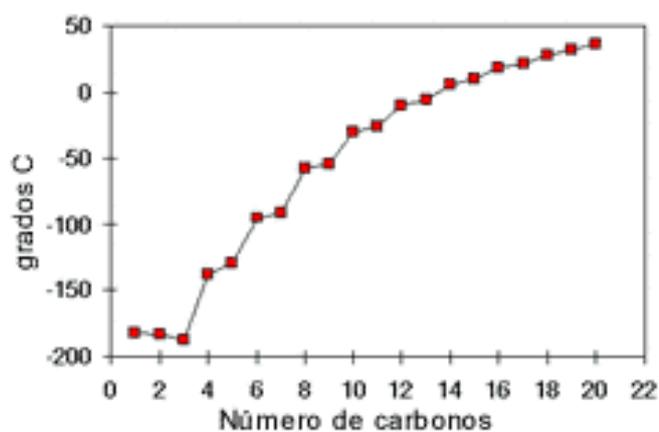


1,2,3 propanotriol (glicerina)

- *Punto de ebullición.*- los puntos de ebullición de los alcoholes también son influenciados por la polaridad del compuesto y la cantidad de puentes de hidrógeno. Los grupos OH presentes en un alcohol hacen que su punto de ebullición sea más alto que el de los hidrocarburos de su mismo peso molecular. En los alcoholes el punto de ebullición aumenta con la cantidad de átomos de carbono y disminuye con el aumento de las ramificaciones.



El punto de fusión aumenta a medida que aumenta la cantidad de carbonos.



- *Densidad.*- la densidad de los alcoholes aumenta con el número de carbonos y sus ramificaciones. Es así que los alcoholes alifáticos son menos densos que el agua mientras que los alcoholes aromáticos y los alcoholes con múltiples moléculas de -OH, denominados polioles, son más densos.

Nombre	Punto de fusión °C	Punto de ebullición °C	Densidad relativa
Etanol	-114,1	78,5	0,789

Metanol	-97,5	64,5	0,793
1-propanol	-126	97,8	0,804
2-propanol	-86	82,3	0,789
1-butanol	-90	117	0,810
2-butanol	-114	99,5	0,806
2-metil-1-propanol	-108	107,3	0,802
2-metil-2-propanol	25,5	82,8	0,789
1-pentanol	-78,5	138	0,817
Ciclohexanol	24	161,5	0,962

**Tabla 4.** Constantes físicas de algunos alcoholes.

**b. Propiedades químicas.-** Los alcoholes pueden comportarse como ácidos o bases, esto gracias al efecto inductivo, que no es más que el efecto que ejerce la molécula de  $-OH$  como sustituyente sobre los carbonos adyacentes. Gracias a este efecto se establece un dipolo.

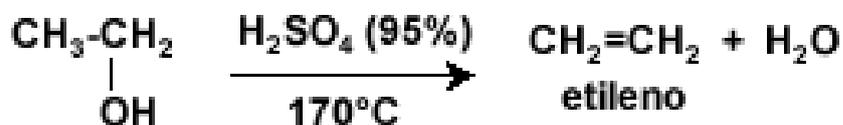
- *Acidez.-* la estructura del alcohol está relacionada con su acidez. Metanol > alcohol primario > alcohol secundario > alcohol terciario (> mayor acidez).

Alcohol Terciario	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{CH}_3 - \text{C} - \text{CH}_3 \\   \\ \text{OH} \end{array}$	2-metil-2-propanol
Alcohol Secundario	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_3 \\   \\ \text{OH} \end{array}$	2-butanol
Alcohol Primario	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 \\   \\ \text{OH} \end{array}$	1-butanol
Metanol	$\text{CH}_3 - \text{OH}$	

Debido a que en el metanol y en los alcoholes primarios el hidrógeno está menos firmemente unido al oxígeno, la salida de los protones de la molécula es más fácil por lo que la acidez será mayor en el metanol y el alcohol primario.

- *Deshidratación.-* la deshidratación de los alcoholes se considera una reacción de eliminación, donde el alcohol pierde su grupo  $-OH$  para dar

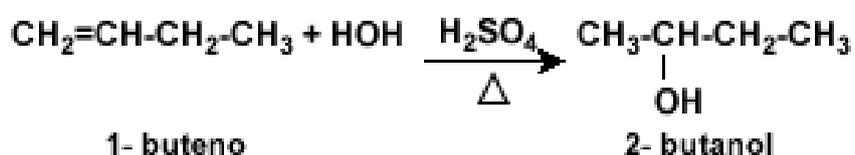
origen a un alqueno. Aquí se pone de manifiesto el carácter básico de los alcoholes. La reacción ocurre en presencia de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) en presencia de calor.



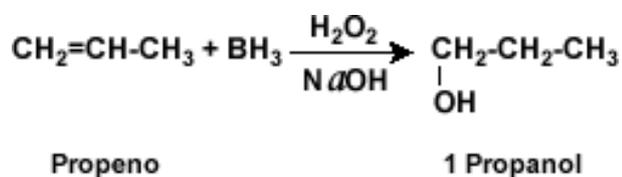
El calentamiento de un alcohol en presencia de ácido sulfúrico a temperaturas inferiores a las necesarias para obtener alquenos producirá otros compuestos como éteres y ésteres.

### 7.5.2.3. Obtención del alcohol

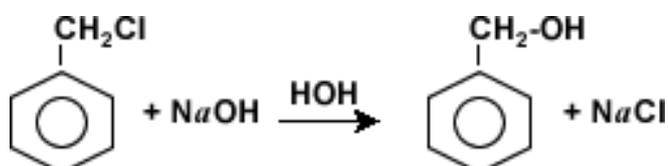
Al igual que a partir de los alcoholes se pueden obtener otros compuestos, los alcoholes pueden ser obtenidos a partir de hidratación o hidroborcación – oxidación de alquenos, o mediante hidrólisis de halogenuros de alquilo. Para la obtención de alcoholes por hidratación de alquenos se utiliza el ácido sulfúrico y el calor.



- a. *Hidroborcación.*- (adición de borano R<sub>3</sub>B) de alqueno en presencia de peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) en medio alcalino da origen a un alcohol.



- b. *Hidrólisis.*- de halogenuros de alquilo o aralquilo se produce en presencia de agua y hidróxidos fuertes que reaccionan para formar alcoholes.



En la industria la producción de alcoholes se realiza a través de diversas reacciones como las ya mencionadas, sin embargo se busca que éstas sean rentables para proporcionar la máxima cantidad de producto al menor costo. Entre las técnicas utilizadas por la industria para la producción de alcoholes se encuentra la fermentación donde la producción de ácido butírico a partir de compuestos azucarados por acción de bacterias como el *Clostridium butycum* dan origen al butanol e isopropanol. Para la producción de alcoholes superiores en la industria la fermentación permite la producción de alcoholes isoamílico, isobutílico y n-propílico a partir de aminoácidos. Es así como la industria utiliza los procesos metabólicos de ciertas bacterias para producir alcoholes.

Para obtener etanol libre de agua se aplica la destilación azeotrópica en una mezcla con benceno o ciclohexano. De estas mezclas se destila a temperaturas más bajas el azeótropo, formado por el disolvente auxiliar con el agua, mientras que el etanol se queda retenido. Otro método de purificación muy utilizado actualmente es la absorción física mediante tamices moleculares a escala de laboratorio también se pueden utilizar disecantes como el magnesio, que reacciona con el agua formando hidrógeno y óxido de magnesio.

### 7.5.3. **ESENCIAS**<sup>6</sup>

#### 7.5.3.1. **Definición**

Las esencias naturales también llamadas aceites esenciales, son extraídas de las vegetales que las contienen, estén éstas radicadas en las flores, hojas, frutos, raíces, cortezas, etc.

Los aceites esenciales son productos químicos que forman las esencias odoríferas de un gran número de vegetales. El concepto "aceite esencial" se aplica también a las sustancias sintéticas obtenidas a partir del alquitrán de hulla, y a las sustancias semisintéticas preparadas a partir de los aceites esenciales naturales. Cualquier perfume, al ser inspirado produce un efecto alquímico instantáneo y cada uno de los aromas

---

<sup>6</sup> <http://www.revolucionesindustriales.com/industrias-caseras/esencias.html>

puede influir de distintas formas en los mundos sutiles. Estos aromas pueden transferirse por medio de perfumes, óleos, sahumeros, inciensos, etc. Los aceites esenciales se extraen de los tejidos mediante diversos procedimientos físicos y químicos según la cantidad y estabilidad del compuesto que se pretenda obtener.

El término destilar proviene del latín “destillare”: separar por medio del calor, alambiques u otros vasos una sustancia volátil llamada esencia de otras más fijas, enfriando luego su vapor para reducirla nuevamente a líquido.

La destilación es un proceso físico pues no se produce ninguna transformación de sustancias sino una separación, desde el punto de vista de la física la destilación se define del siguiente modo: “muchas sustancias de punto de ebullición muy alto, calentadas juntamente con el agua pasan a estado de vapor a la temperatura de ebullición de ésta, son por lo tanto, volátiles con el vapor de agua y pueden obtenerse y purificarse por destilación en corriente de ese vapor”.

Los aceites esenciales son líquidos volátiles, en su mayoría insolubles en agua, pero fácilmente solubles en alcohol, éter y aceites vegetales y minerales. Por lo general no son oleosos al tacto. Pueden agruparse en cinco clases, dependiendo de su estructura química: alcoholes, ésteres, aldehídos, cetonas y lactonas y óxidos.

### 7.5.3.2. Procedencia de las esencias

Los aceites esenciales proceden de las flores, frutos, hojas, raíces, semillas y corteza de los vegetales. El aceite de espliego, por ejemplo, procede de una flor, el aceite de pachulí, de una hoja, y el aceite de naranja, de un fruto. Los aceites se forman en las partes verdes (con clorofila) del vegetal y al crecer la planta son transportadas a otros tejidos, en concreto a los brotes en flor. Se desconoce la función exacta de un aceite esencial en un vegetal; puede ser para atraer los insectos para la polinización, o para repeler a los insectos nocivos, o puede ser simplemente un producto metabólico intermedio

<b>NOMBRE COMÚN</b>	<b>NOMBRE LATINO</b>	<b>NOMBRE COMÚN</b>	<b>NOMBRE LATINO</b>
ABEDUL	Betula lenta	ABETO	Alries balsamea
AJENJO	Artemisia vulgaris	ALBAHACA	Ocimum basilicum

ALCANFOR	Cinnamomum canfora	ANGÉLICA	Angelica archangelic
ANÍS	Pimpinella anissum	ÁRBOL DE TE	Melaleuca alternifolia
ARRAYÁN	Myrtus communis	BENJUÍ	Styraz benzoin
BERGAMOTA	Citrus bergamina	BOIS DE ROSE	Aniba roseodora
CAMOMILA ALEMANA	Matricaria chamomila	CAMOMILA AZUL	Ormenis multicoloris
CAMOMILA MIXTA	Anthemis mixta	CAMOMILA ROMANA	Anthemis mobilis
CANELA	Cinnamomum zeylanicum	CARDAMOMO	Elettaria cardamomum
CARVI	Carum carvi	CAYEPUT	Melaleuca leucadendrom
CIPRÉS	Cupressis sempervivens	CITISO	Cistus landaniferus
CITRONELA	Cymbopogon nardus	CLAVO	Eugenia caryophyllata
CLEMENTINA	Citrus reticulata	COMINO	Cuminum cyminum
CORTEZA DE CANELA	Cinnamomum zeylanicum	CULANTRO	Coriandrum sativum
ELEMI	Canarium luzonicum	ENEBRO	Juniperus communis
ENELDO	Anethum graveolens	ESPIGA	Lavandula spica
ESTRAGÓN	Artemisa dracunculus	EUCALIPTO	Eucalyptus globulus
EUCALIPTO LIMÓN	Eucalyptus citriodora	EUCALIPTO MENTA	Eucalyptus dive
EUCALIPTO RADIATA	Eucalyptus dive	GÁLBANO	Ferula galbaniflua
GERANIO	Pelargonium graveolens	HIERBABUENA	Mentha spicata
HINOJO	Foeniculum vulgare	HISOPO	Hyssopus officinalis
HOJA DE VIOLETA	Viola odorata	INCIENSO	Boswellia thurifera
JAZMÍN	Jasminum officinale	JENGIBRE (RAIZ DE)	Zingiber officinale
LAUREL	Pimenta racemosa	LAVANDA	Lavandula officinalis
LAVANDINA	Lavandula fragans	LIMA	Citrus aurantifolia
LIMÓN	Citrus limonum	LIMÓN VERBENA	Citroidora lippia
LOVAGE (RAIZ DE)	Levisticum	LÚPULO	Humulus lupulus

	officinale		
MACIS	Myristica fragans	MADERA DE CEDRO	Cedrus atlantica
MANDARINA	Citrus nobilis	MEJORANA	Origanum marjorana
MELISA	Melissa officinalis	MENTA	Mentha piperanta
MILENRAMA	Achillea millenfolium	MIRRA	Commiphora myrrha
NARANJA	Citrus aurantium	NEROLI	Citrus bagaradia
NIAOULI	Melaleuca viridiflora	NUEZ MOSCADA	Myristica fragans
ORÉGANO	Origanum vulgare	PALMAROSA	Cymbopogon martini
PASTO LIMÓN	Cymbopogon citratus	PATCHOULÍ	Pogostemon patchouli
PENNYROYAL	Mentha pugelium	PEREJIL	Petroselinum sativum
PETITGRAIN	Citrus aurantium	PICEA	Picea mariana
PIMIENTA	Piper nigrum	PIMIENTA NEGRA	Piper nigrum
PIMIENTO	Pimienta officinalis	PINO	Pinus silvestris
POMELO	Citrus paradisi	RAVENALA	Ravensara aromatica
ROMERO	Rosmarinum officinalis	ROSA DE MARUECOS	Rosa damasacena
ROSA BÚLGARA	Rosa damasacena	SALVIA	Salvia officinalis
SALVIA CLARA	Salvia sclarea	SÁNDALO	Santalum album
SIEMPREVIVA	Gnaphalium polycephalum	SIEMPREVIVA ITALIANA	Helichrysum angustifolium
TAGETES	Tagetes patula	TEREBINTO	Pinus maritimus
TOMILLO	Thymus	TOMILLO LIMÓN	Thymus hiemalis
TOMILLO ROJO	Vulgaris Thymus	TOMILLO SALSERO	Satureia montana
VALERIANA	Valeriana officinalis	VETIVER	Vetiveria zizanoides
YLANG-YLANG	Calanga odorata	ZANAHORIA	Daucus carota

**Tabla 5.** Listado de varios aceites esenciales.

### 7.5.3.3. Métodos de obtención de esencias<sup>7</sup>

Los aceites esenciales son productos naturales aplicados en diferentes industrias, como son la farmacéutica, alimenticia, en perfumería, entre otros usos. Actualmente, se

<sup>7</sup> [http://depa.pquim.unam.mx/amyd/archivero/DEST\\_ARRASTRE\\_VAPOR\\_14215.pdf](http://depa.pquim.unam.mx/amyd/archivero/DEST_ARRASTRE_VAPOR_14215.pdf)

constituyen en productos alternativos para la elaboración de biopesticidas o bioherbicidas.

La obtención de los aceites esenciales es realizada comúnmente por la tecnología llamada de destilación por arrastre con vapor, en sus diferentes modalidades. La pureza y el rendimiento del aceite esencial dependerán de la técnica que se utilice para el aislamiento.

Cuando se usa vapor saturado o sobrecalentado, generado fuera del equipo principal, ya sea por una caldera, una olla de presión o un matraz adecuado, esta técnica recibe el nombre de “destilación por arrastre con vapor”, propiamente dicha.

También se puede usar el llamado “método directo”, en el que el material está en contacto íntimo con el agua generadora del vapor. En este caso, se ponen en el mismo recipiente el agua y el material a extraer, se calientan a ebullición y el aceite extraído es arrastrado junto con el vapor de agua hacia un condensador, que enfría la mezcla, la cual es separada posteriormente para obtener el producto deseado. Este método es usado de preferencia cuando el material a extraer es líquido o cuando se utiliza de forma esporádica.

Una variante de esta última técnica es la llamada “hidrodestilación”, en la que se coloca una trampa al final del refrigerante, la cual va separando el aceite del agua condensada, con lo cual se mejora y se facilita el aislamiento del aceite esencial. También puede montarse como un reflujo, con una trampa de Clevenger para separar aceites más ligeros que el agua.

El vapor de agua condensado acompañante del aceite esencial es llamado “agua floral” y posee una pequeña concentración de los compuestos químicos solubles del aceite esencial, lo cual le otorga un ligero aroma, semejante al del aceite obtenido. En algunos equipos industriales, el agua floral puede ser reciclada continuamente, o bien, es comercializada como un subproducto (Agua de Colonia, Agua de Rosas, etc.).

#### 7.5.4. **EVAPORACIÓN**<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> [http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/tecnologia\\_evaporacion.asp](http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/tecnologia_evaporacion.asp)

#### **7.5.4.1. Definición**

La evaporación es el proceso por el cual las moléculas en estado líquido (por ejemplo, el agua) se hacen gaseosas espontáneamente (ej.: vapor de agua). Es lo opuesto a la condensación. Generalmente, la evaporación puede verse por la desaparición gradual del líquido cuando se expone a un volumen significativo de gas.

Por término medio, las moléculas no tienen bastante energía para escaparse del líquido, porque de lo contrario el líquido se convertiría en vapor rápidamente. Cuando las moléculas chocan, se transfieren la energía de una a otra en grados variantes según el modo en que chocan.

Los líquidos que no parecen evaporarse visiblemente a una temperatura dada en un gas determinado (p.ej., el aceite de cocina a temperatura ambiente) poseen moléculas que no tienden a transferirse la energía de una a otra como para darle "la velocidad de escape" (la energía calórica) necesaria para convertirse en vapor. Sin embargo, estos líquidos se evaporan, pero el proceso es mucho más lento y considerablemente menos visible.

La evaporación es una parte esencial del ciclo del agua. La energía solar provoca la evaporación del agua de los océanos, lagos, humedad del suelo y otras fuentes de agua. En hidrología, la evaporación y la transpiración (que implica la evaporación dentro del estoma de la planta) reciben el nombre conjunto de evapotranspiración.

#### **7.5.4.2. Teoría cinética**

Para que las moléculas de un líquido se evaporen, deben estar localizadas cerca de la superficie, moverse en la dirección apropiada y tener la energía cinética suficiente como para vencer las fuerzas intermoleculares de la fase líquida. Sólo una pequeña proporción de las moléculas cumplen con estos criterios, por lo que la tasa de evaporación es limitada. Ya que la energía cinética de una molécula es proporcional a su temperatura, la evaporación se produce más rápido conforme la temperatura es más alta. Como las moléculas que se mueven más rápido escapan, las moléculas restantes tienen una energía cinética media inferior, y por tanto la temperatura del líquido disminuye.

Este fenómeno se conoce como refrigeración evaporativa, y es la razón por la cual la evaporación del sudor refresca el cuerpo humano. La evaporación también tiende a producirse más rápidamente con tasas de flujo más altas entre la fase gaseosa y líquida, y en líquidos con presión de vapor más alta. Por ejemplo, la ropa tendida en un cordel secará (por evaporación) más rápidamente durante un día ventoso que en un día sin viento. Tres puntos claves de la evaporación son el calor, la humedad y el movimiento del aire.

#### **7.5.4.3. Factores que influyen en la tasa de evaporación**

- *Concentración de la sustancia que se evapora en el aire.*- si el aire ya tiene una alta concentración de la sustancia que se evapora, entonces la sustancia se evaporará más despacio.
- *Concentración de otras sustancias en el aire.*- si el aire ya está saturado con otras sustancias, puede tener una capacidad inferior para la sustancia que se evapora.
- *Tasa de flujo de aire.*- si el aire fresco se mueve sobre la sustancia todo el tiempo, la concentración de la sustancia en el aire tendrá menos probabilidad de subir con el tiempo, potenciando así una evaporación más rápida. Esto resulta en una capa divisoria en la superficie de evaporación que disminuye con la velocidad de flujo, disminuyendo la distancia de difusión en la capa estancada.
- *Concentración de otras sustancias en el líquido (impurezas).*- si el líquido contiene otras sustancias, tendrá una capacidad inferior para la evaporación.
- *Temperatura de la sustancia.*- si la sustancia está más caliente, la evaporación será más rápida.
- *Fuerzas intermoleculares.*- cuanto mayores son las fuerzas que mantienen las moléculas juntas en el líquido, más energía será necesaria para evaporarlas.
- *Área superficial.*- una sustancia que tiene un área superficial más grande se evaporará más rápido, ya que hay más moléculas superficiales que son capaces de escaparse.
- *Calentamiento.*- cuanto más grueso es el recipiente donde se está calentando, más se reduce la evaporación del agua, debido a que se dedica menos calor a los propios elementos de la evaporación.

## 7.5.5. CONDENSACIÓN<sup>9</sup>

### 7.5.5.1. Definición

Se denomina condensación al cambio de estado de la materia que se encuentra en forma gaseosa a forma líquida. Es el proceso inverso a la vaporización. Si se produce un paso de estado gaseoso a estado sólido de manera directa, el proceso es llamado sublimación inversa. Si se produce un paso del estado líquido a sólido se denomina solidificación.

Aunque el paso de gas a líquido depende, entre otros factores, de la presión y de la temperatura, generalmente se llama condensación al tránsito que se produce a presiones cercanas a la ambiental. Cuando se usa una sobrepresión elevada para forzar esta transición, el proceso se denomina licuefacción.

El proceso de condensación suele tener lugar cuando un gas es enfriado hasta su punto de rocío, sin embargo este punto también puede ser alcanzado variando la presión. El equipo industrial o de laboratorio necesario para realizar este proceso de manera artificial se llama condensador.

La ciencia que estudia las propiedades termodinámicas del aire húmedo y los efectos que tiene la variación de la humedad atmosférica sobre los materiales y el ser humano. Las interrelaciones entre los parámetros que determinan la condición del aire húmedo se representan en los diagramas psicrométricos. La condensación es un proceso regido con los factores en competición de energía y entropía. Mientras que el estado líquido es más favorable desde el punto de vista energético, el estado gas es el más entrópico.

### 7.5.5.2. Aplicaciones

La condensación es esencial para el proceso de destilación, un proceso muy importante tanto para el trabajo en el laboratorio como para aplicaciones industriales.

El hecho de que la condensación sea un proceso natural, el llamado rocío, provoca que sea de gran utilidad para conseguir agua: Podemos encontrar muchas estructuras creadas

---

<sup>9</sup> [http://es.wikipedia.org/wiki/Condensaci%C3%B3n\\_\(f%C3%ADsica\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Condensaci%C3%B3n_(f%C3%ADsica))

con el único propósito de conseguir agua a partir de la condensación, como el caso del estanque de rocío o un colador para recoger la humedad del aire. Muchos de los sistemas que se usan para recoger agua a partir de la condensación son usados para aprovechar y mantener la humedad de la tierra en zonas con una avanzada desertificación en proceso.

#### 7.5.6. INTERCAMBIADOR DE CALOR<sup>10</sup>

La aplicación de los principios de la transferencia de calor al diseño de un equipo destinado a cubrir un objeto determinado en ingeniería, es de capital importancia, porque al aplicar los principios al diseño, se debe trabajar en la consecución del importante logro que supone el desarrollo de un producto para obtener provecho económico.

##### 7.5.6.1. Definición

El equipo de transferencia de calor se define por las funciones que desempeña en un proceso. Los intercambiadores recuperan calor entre dos corrientes en un proceso. Los calentadores se usan primeramente para calentar fluidos de proceso, y generalmente se usa vapor con este fin. Los enfriadores se emplean para enfriar fluidos en un proceso, el agua es el medio enfriador principal.

Los condensadores son enfriadores cuyo propósito principal es eliminar calor latente en lugar de calor sensible. Los hervidores tienen el propósito de suplir los requerimientos de calor en los procesos como calor latente. Los evaporadores se emplean para la concentración de soluciones por evaporación de agua u otro fluido.



<sup>10</sup> [http://www.telecable.es/personales/albatros1/calor/transferencia\\_de\\_calor\\_07\\_intercambiadores.htm](http://www.telecable.es/personales/albatros1/calor/transferencia_de_calor_07_intercambiadores.htm)

**Figura 3.** Condensador

**Figura 4.** Intercambiador de calor

### 7.5.6.2. Tipos de intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor se pueden clasificar en muchas formas diferentes. Una forma consiste en basar la clasificación en las direcciones relativas del flujo de los fluidos calientes y frío, dando lugar a términos como fluidos paralelos, cuando ambos fluidos se mueven en la misma dirección; flujo encontrado, cuando los fluidos se mueven en paralelo pero en sentido opuesto; y flujo cruzado, cuando las direcciones de flujo son mutuamente perpendiculares.

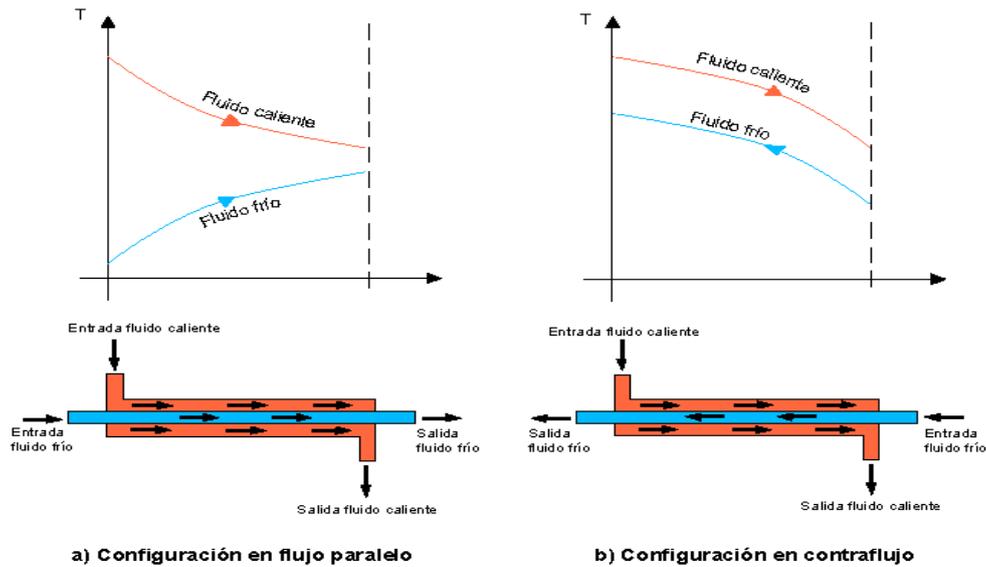
Otra manera de clasificar los intercambiadores de calor, es mediante la estructura y uso de los mismos, como se muestra a continuación:

- a. **Tubo doble.-** es el tipo más sencillo de intercambiador de calor. Está constituido por dos tubos concéntricos de diámetros diferentes. Uno de los fluidos fluye por el tubo de menor diámetro y el otro fluido fluye por el espacio anular entre los dos tubos. En este tipo de intercambiador son posibles dos configuraciones en cuanto a la dirección del flujo de los fluidos: contraflujo y flujo paralelo.

En la configuración en flujo paralelo los dos fluidos entran por el mismo extremo y fluyen en el mismo sentido. En la configuración en contraflujo los fluidos entran por los extremos opuestos y fluyen en sentidos opuestos. En un intercambiador de calor en flujo paralelo la temperatura de salida del fluido frío nunca puede ser superior a la temperatura de salida del fluido caliente.

En un intercambiador de calor en contraflujo la temperatura de salida del fluido frío puede ser superior a la temperatura de salida del fluido caliente. El caso límite se tiene cuando la temperatura de salida del fluido frío es igual a la temperatura de entrada del fluido caliente. La temperatura de salida del fluido frío nunca puede ser superior a la temperatura de entrada del fluido caliente.

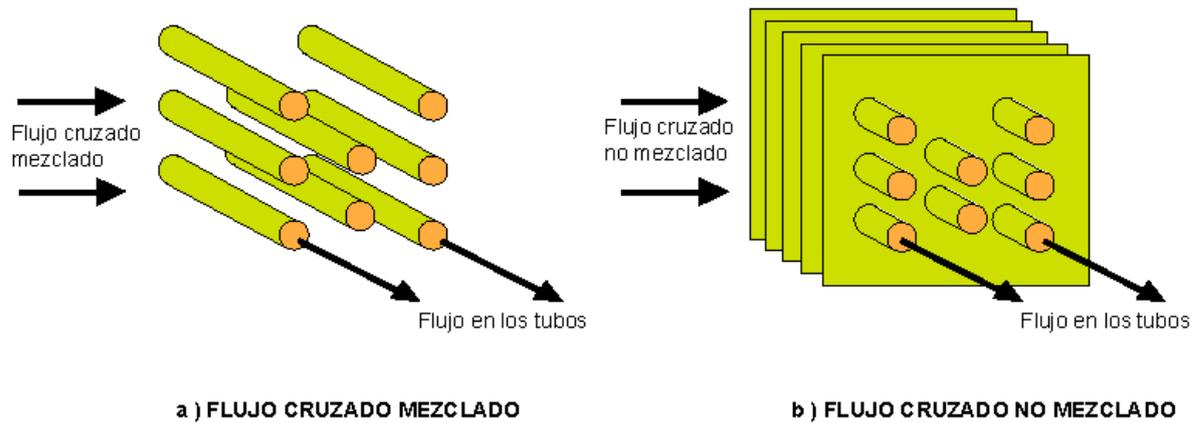
En la figura siguiente se muestran esquemas de las dos configuraciones así como la evolución de la temperatura de los fluidos en cada una de ellas:



**Figura 5.** Configuraciones de flujo y evolución de temperatura (a,b)

- b. Compactos.-** son intercambiadores diseñados para lograr un gran área superficial de transferencia de calor por unidad de volumen. La razón entre el área superficial de transferencia de calor y su volumen es la densidad de área  $b$ . Un intercambiador con  $b > 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$  se clasifica como compacto. Ejemplos de intercambiadores de calor compactos son los radiadores de automóviles, los intercambiadores de calor de cerámica de vidrio de las turbinas de gas, el regenerador del motor Stirling y el pulmón humano.

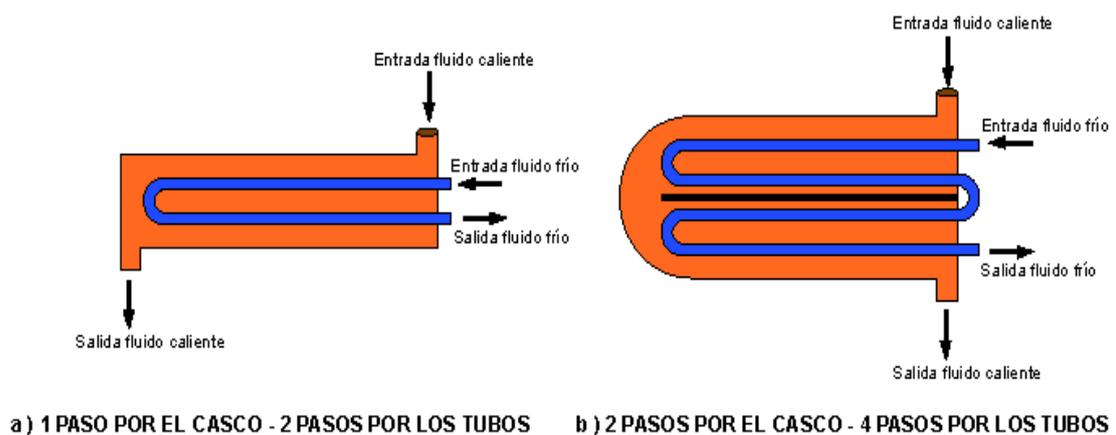
En los intercambiadores compactos los dos fluidos suelen moverse en direcciones ortogonales entre sí. Esta configuración de flujo recibe el nombre de flujo cruzado. El flujo cruzado se clasifica a su vez en mezclado ( uno de los fluidos fluye libremente en dirección ortogonal al otro sin restricciones ) y no mezclado ( se disponen una placas para guiar el flujo de uno de los fluidos ). En la figura siguiente se muestran esquemas de ambos tipos de flujo:



**Figura 6.** Flujo cruzado (a,b)

c. **Casco y tubos.**- es el tipo más común de intercambiador de calor en las aplicaciones industriales. Este tipo de intercambiadores están compuestos por gran cantidad de tubos (a veces varios cientos) contenidos en un casco. Los tubos se disponen con sus ejes paralelos al eje del casco.

La transferencia de calor tiene lugar a medida que uno de los fluidos se mueve por el interior de los tubos mientras que el otro se mueve por fuera de éstos, por el casco. Este tipo de intercambiadores se clasifican por el número de pasos por el casco y por el número de pasos por los tubos. En la figura siguiente se muestran dos ejemplos:



**Figura 7.** Ejemplos de intercambiadores de casco y tubos.

## 7.5.7. DESTILACIÓN<sup>11</sup>

### 7.5.7.1. Definición

La destilación es un proceso que consiste separar los distintos componentes de una mezcla mediante el calor. Para ello que se calienta esa sustancia, normalmente en estado líquido, para que sus componentes más volátiles pasen a estado gaseoso o de vapor y a continuación volver esos componentes al estado líquido mediante condensación por enfriamiento.

El principal objetivo de la destilación es separar los distintos componentes de una mezcla aprovechando para ello sus distintos grados de volatilidad. Otra función de la destilación es separar los elementos volátiles de los no volátiles de una mezcla.

En otros sistemas similares como la evaporación o el secado, normalmente el objetivo es obtener el componente menos volátil; el componente más volátil, casi siempre agua, se desecha. 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 recibe el nombre de destilación, aunque se usan mecanismos similares en ambos casos.

Si la diferencia entre las temperaturas de ebullición o volatilidad de las sustancias es grande, se puede realizar fácilmente la separación completa en una sola destilación. Es el caso de la obtención de agua destilada a partir de agua marina. Esta contiene aproximadamente el 4% de distintas materias sólidas en disolución.

En ocasiones, los puntos de ebullición de todos o algunos de los componentes de una mezcla difieren en poco entre sí por lo que no es posible obtener la separación completa en una sola operación de destilación por lo que se suelen realizar dos o más. Así el ejemplo del alcohol etílico y el agua. El primero tiene un punto de ebullición de 78,5 °C y el agua de 100 °C por lo que al hervir esta mezcla se producen unos vapores con

---

<sup>11</sup> [http://www.alambiques.com/tecnicas\\_destilacion.htm](http://www.alambiques.com/tecnicas_destilacion.htm)

ambas sustancias aunque diferentes concentraciones y más ricos en alcohol. Para conseguir alcohol industrial o vodka es preciso realizar varias destilaciones.

### 7.5.7.2. Teoría de la destilación

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.

Esta sencilla relación fue anunciada por vez primera por el químico francés François Marie Raoult (1830-1901) y se llama ley de Raoult. Esta ley sólo se aplica a mezclas de líquidos muy similares en su estructura química, como el benceno y el tolueno. En la mayoría de los casos se producen amplias desviaciones de esta ley. Si un componente sólo es ligeramente soluble en el otro, su volatilidad aumenta anormalmente.

En el ejemplo anterior, la volatilidad del alcohol en disolución acuosa diluida es varias veces mayor que la predicha por la ley de Raoult. 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.

### 7.5.7.3. Tipos de destilación<sup>12</sup>

- a. **Destilación simple.**- En química, se llama destilación simple o destilación sencilla a un tipo de destilación donde los vapores producidos son inmediatamente canalizados hacia un condensador, el cual los refresca y condensa de modo que el destilado no resulta puro. Su composición será idéntica a la composición de los vapores a la presión y temperatura dados y pueden ser computados por la ley de Raoult.

---

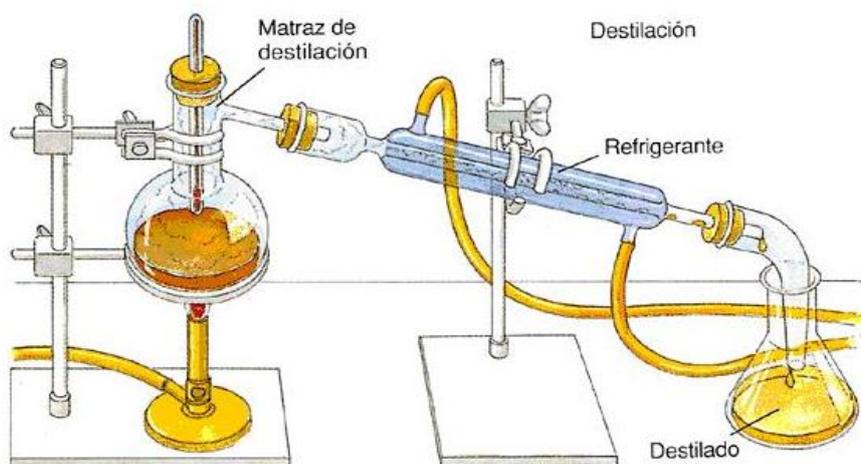
<sup>12</sup> <http://operaciones-unitarias-1.wikispaces.com/Tipos+de+Destilacion>

La destilación es una operación utilizada con el fin de purificar y aislar líquidos orgánicos generalmente. Ésta aprovecha las volatilidades y puntos de ebullición de los componentes líquidos a separar.

La destilación simple consiste en la separación de uno o varios componentes de una mezcla líquida cuyos puntos de ebullición difieren entre sí en un rango suficientemente marcado (al menos  $25^{\circ}\text{C}$ ) y deben ser inferiores a  $150^{\circ}\text{C}$  o para separar líquidos de sólidos no volátiles.

Para éstos casos, las presiones de los componentes del vapor normalmente son suficientemente diferentes de modo que la *ley de Raoult* puede descartarse debido a la insignificante contribución del componente menos volátil. En este caso, el destilado puede ser suficientemente puro para el propósito buscado. Ejemplos de sistemas típicos en los que se aplica este tipo de destilación:

- ✓ Sistema Butanol-Etanol.
- ✓ Sistema Agua-Metanol.



**Figura 8.** Diagrama en el que se muestra la operación destilación tipo simple.

El aparato utilizado para la destilación en el laboratorio es el alambique. Consta de un recipiente donde se almacena la mezcla a la que se le aplica calor, un condensador donde se enfrían los vapores generados, llevándolos de nuevo al estado líquido y un recipiente donde se almacena el líquido concentrado.

Se usa para separar líquidos con puntos de ebullición inferiores a 150°C de impurezas no volátiles, o bien para separar mezclas de dos componentes que hiervan con una diferencia de puntos de ebullición de al menos 60-80°C. Mezclas de sustancias cuyos puntos de ebullición difieren de 30-60°C se pueden separar por destilaciones sencillas repetidas, recogiendo durante la primera destilación fracciones enriquecidas en uno de los componentes, las cuales se vuelven a destilar.

- b. Destilación fraccionaria.-** la destilación fraccionada se utiliza cuando la mezcla de productos líquidos que se pretende destilar contiene sustancias volátiles de diferentes puntos de ebullición con una diferencia entre ellos menor a 80 °C.

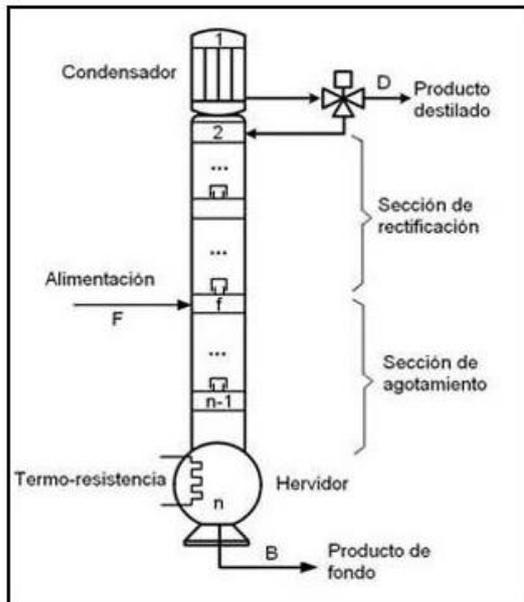
Al calentar una mezcla de líquidos de diferentes presiones de vapor, el vapor se enriquece en el componente más volátil y esta propiedad se aprovecha para separar los diferentes compuestos líquidos mediante este tipo de destilación.



**Figura 9.** Estructura de destilación fraccionaria para laboratorio.

El rasgo más característico de este tipo de destilación es que necesita una columna de fraccionamiento, la destilación fraccionada se puede realizar a *presión atmosférica* o a *presión reducida*, tal como para la destilación simple.

Algunos de los ejemplos más comunes son el petróleo, y la producción de etanol.



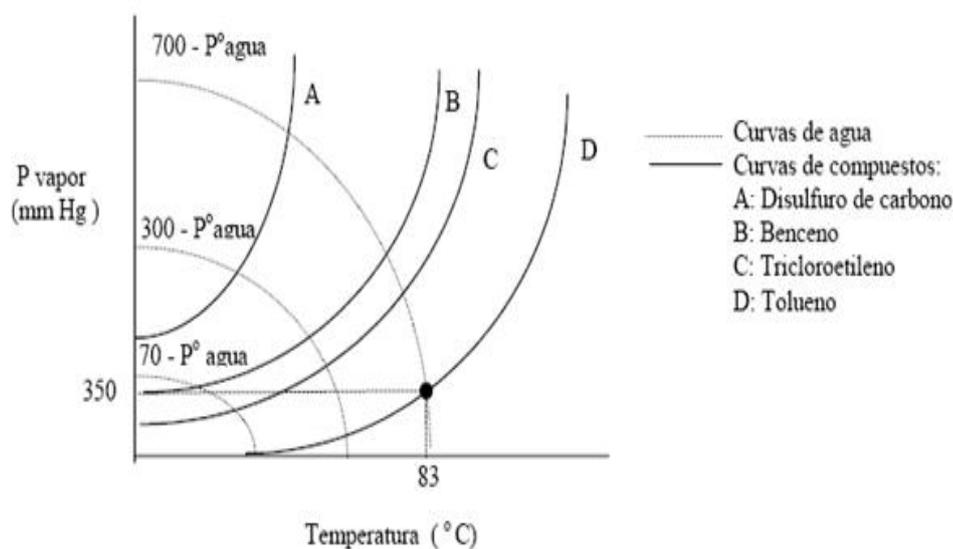
**Figura 10.** Proceso de destilación de etanol. **Figura 11.** Destilador a nivel industrial.

c. **Destilación por arrastre de vapor.**- la destilación por arrastre de vapor posibilita la purificación o el aislamiento de compuestos de punto de ebullición elevado mediante una destilación a baja temperatura (siempre inferior a 100 °C). Es una técnica de destilación muy útil para sustancias de punto de ebullición muy superior a 100 °C y que descomponen antes o al alcanzar la temperatura de su punto de ebullición.

La destilación por arrastre de vapor es una técnica de destilación que permite la separación de sustancias insolubles en H<sub>2</sub>O y ligeramente volátiles de otros productos no volátiles. A la mezcla que contiene el producto que se pretende separar, se le adiciona un exceso de agua, y el conjunto se somete a destilación. En el matraz de destilación se recuperan los compuestos no volátiles y/o solubles en agua caliente, y en el matraz colector se obtienen los compuestos volátiles e insolubles en agua. Finalmente, el aislamiento de los compuestos orgánicos recogidos en el colector se realiza mediante una extracción.

En 1918 Hausbrand publicó un diagrama de presión de vapor útil para la destilación por arrastre. Se graficó  $P_{total} - P^{o}H_2O$  contra temperatura a tres presiones totales: 760, 300 y 70 mmHg (curvas descendentes) a las cuales se les conoce como curvas de agua. A su vez graficó la presión parcial ( $P^o$ ) contra temperatura para diversos materiales a destilar (curvas ascendentes). La

intersección de la curva de agua con la del material a destilar nos proporciona la temperatura a la cual se dará la destilación por arrastre.



**Figura 12.** Diagrama de Hausbrand.

La destilación por arrastre con vapor es una técnica usada para separar sustancias orgánicas insolubles en agua y ligeramente volátiles, de otras no volátiles que se encuentran en la mezcla, como resinas o sales inorgánicas, u otros compuestos orgánicos no arrastrables. La destilación por arrastre de vapor se basa en la **Ley de Dalton**.

Los vapores saturados de los líquidos inmiscibles sigue la Ley de Dalton sobre las presiones parciales, que dice que: cuando dos o más gases o vapores, que no reaccionan entre sí, se mezclan a temperatura constante, cada gas ejerce la misma presión que si estuviera solo y la suma de las presiones de cada uno, es igual a la presión total del sistema. Su expresión matemática es la siguiente:

$$P_T = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

Al destilar una mezcla de dos líquidos inmiscibles, su punto de ebullición será la temperatura a la cual la suma de las presiones de vapor es igual a la atmosférica. Esta temperatura será inferior al punto de ebullición del componente más volátil.

Si uno de los líquidos es agua (*destilación por arrastre con vapor de agua*) y si se trabaja a la presión atmosférica, se podrá separar un componente de mayor punto de ebullición que el agua a una temperatura inferior a 100°C. Esto es muy importante cuando el compuesto se descompone a su temperatura de ebullición o cerca de ella.

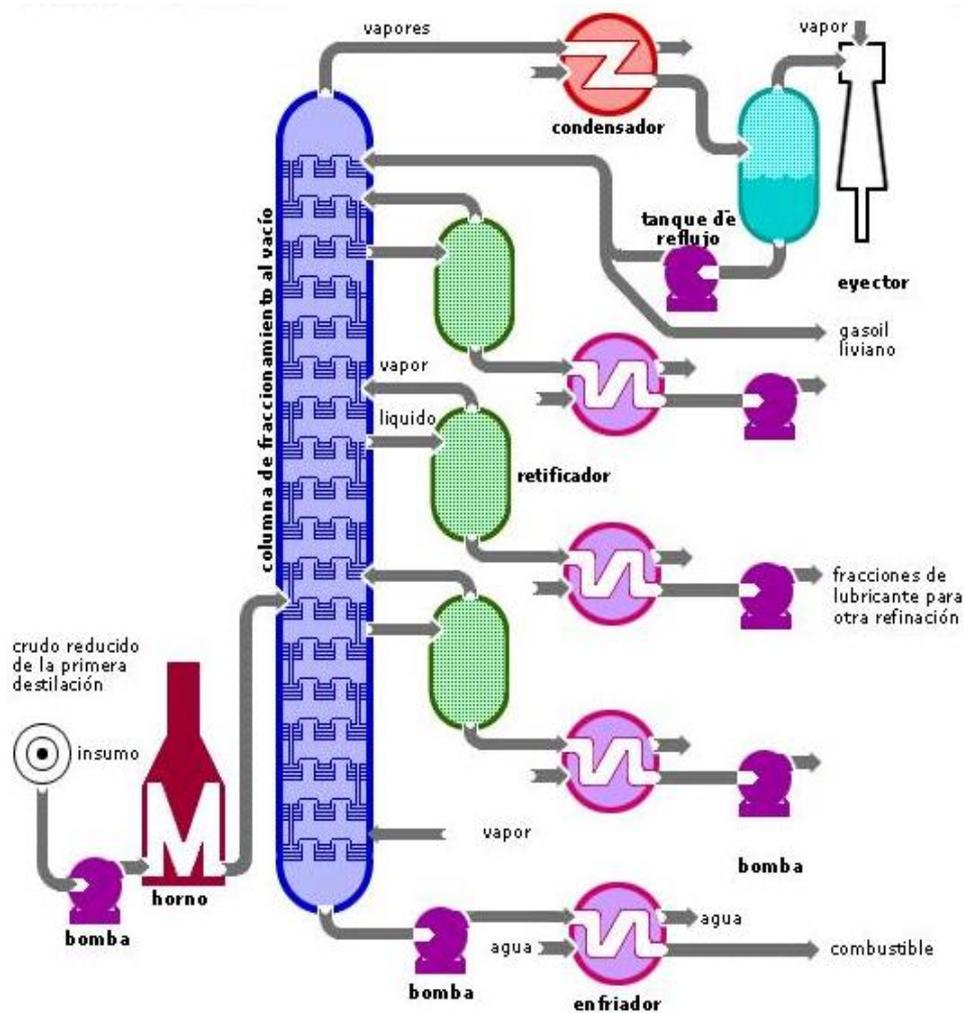
En general, esta técnica se utiliza cuando los compuestos cumplen con las condiciones de ser volátiles, inmiscibles en agua, tener presión de vapor baja y punto de ebullición alto.

- d. Destilación al vacío.-** otro método para destilar sustancias a temperaturas por debajo de su punto normal de ebullición es evacuar parcialmente el alambique. Por ejemplo, la anilina puede ser destilada a 100 °C extrayendo el 93% del aire del alambique. Este método es tan efectivo como la destilación por vapor, pero más caro. Cuanto mayor es el grado de vacío, menor es la temperatura de destilación. Si la destilación se efectúa en un vacío prácticamente perfecto, el proceso se llama destilación molecular.

Este proceso se usa normalmente en la industria para purificar vitaminas y otros productos inestables. Se coloca la sustancia en una placa dentro de un espacio evacuado y se calienta. El condensador es una placa fría, colocada tan cerca de la primera como sea posible. La mayoría del material pasa por el espacio entre las dos placas, y por lo tanto se pierde muy poco.

La destilación al vacío se utiliza en productos naturales, como en la separación de vitaminas a partir de aceites animales y de pescado, lo mismo que en la separación de muchos productos sintéticos industriales (como plastificantes).

Un ejemplo usual sería la destilación al vacío como operación complementaria en la destilación del crudo (petróleo), una vez destilado a presión ordinaria, como se muestra en la figura siguiente:

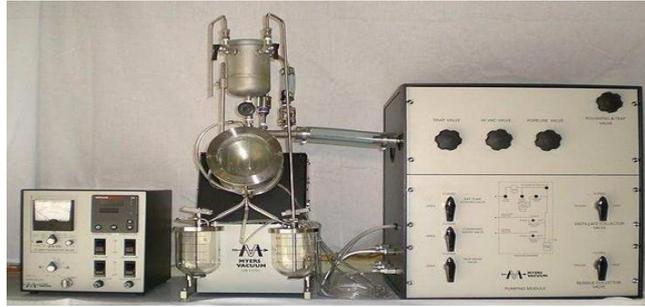


**Figura 13.** Componentes generales de una torre de vacío.

- e. **Destilación molecular centrífuga.**- si una columna larga que contiene una mezcla de gases se cierra herméticamente y se coloca en posición vertical, se produce una separación parcial de los gases como resultado de la gravedad.

En una centrifugadora de alta velocidad, o en un instrumento llamado vórtice, las fuerzas que separan los componentes más ligeros de los más pesados son miles de veces mayores que las de la gravedad, haciendo la separación más eficaz.

Por ejemplo, la separación del hexafluoruro de uranio gaseoso,  $UF_6$ , en moléculas que contienen dos isótopos diferentes del uranio, uranio 235 y uranio 238, puede ser llevada a cabo por medio de la destilación molecular centrífuga.

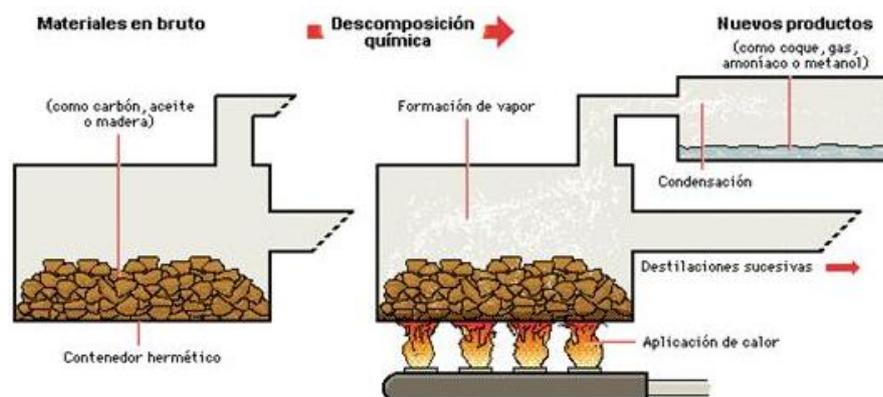


**Figura 14.** Equipo utilizado en la destilación centrífuga molecular.

La destilación molecular centrífuga es una técnica de depuración que tiene una amplia utilización en la industria química, procesamiento de alimentos, productos farmacéuticos y las industrias del petróleo, así como la industria de productos químicos especiales.

- f. **Destilación destructiva.-** Cuando se calienta una sustancia a una temperatura elevada, descomponiéndose en varios productos valiosos, y esos productos se separan por fraccionamiento en la misma operación, el proceso se llama destilación destructiva.

Las aplicaciones más importantes de este proceso son la destilación destructiva del carbón para el coque, el alquitrán, el gas y el amoníaco, y la destilación destructiva de la madera para el carbón de leña, el ácido etanoico, la propanona y el metanol. Este último proceso ha sido ampliamente desplazado por procedimientos sintéticos para fabricar distintos subproductos. El craqueo del petróleo es similar a la destilación destructiva.



**Figura 15.** Diagrama de proceso de la destilación destructiva.

La destilación destructiva o seca se utiliza para convertir materiales en bruto, por ejemplo, derivados de la madera, en productos químicos útiles. Los procesos típicos de destilación, como la desalinización, sólo llevan a cabo la separación física de los componentes. En cambio, la destilación destructiva es una transformación química; los productos finales (metanol, carbón de leña) no pueden ser reconvertidos en madera.

- g. Destilación azeotrópica.-** una mezcla azeotrópica es aquella mezcla líquida de dos o más componentes que poseen una temperatura de ebullición constante y fija, esta mezcla azeotrópica se forma debido a que al pasar al estado vapor se comporta como un líquido puro, es decir como si fuese un solo componente, esto se verifica en el hecho que el vapor producido por la evaporación parcial del líquido tiene la misma composición que el líquido.

El azeótropo que hierve a una temperatura máxima se llama azeótropo positivo y el que lo hace a una temperatura mínima se llama azeótropo negativo. La mayoría de azeótropos son del tipo negativo.

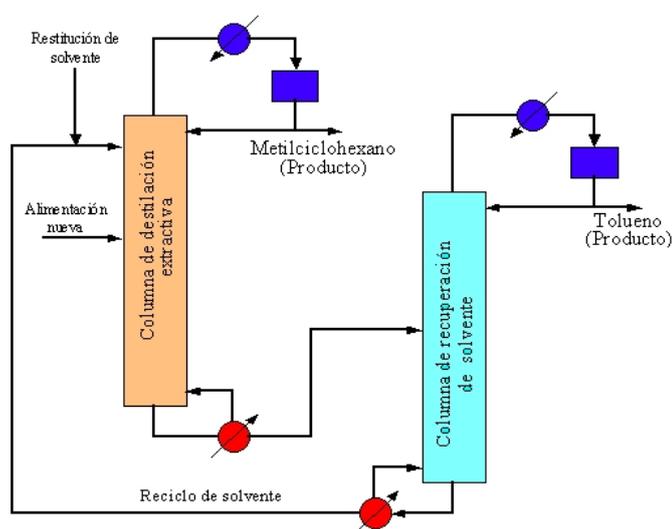
Un azeótropo, puede hervir a una temperatura superior, intermedia o inferior a la de los constituyentes de la mezcla, permaneciendo el líquido con la misma composición inicial, al igual que el vapor, por lo que no es posible separarlos por destilación simple, por lo que es necesario añadir otro componente para romper la mezcla azeotrópica.

Si las temperaturas son muy altas, se puede utilizar la destilación al vacío, lo que disminuye los puntos de ebullición de las sustancias, así como la proporción de las mezclas. La composición de la mezcla azeotrópica cambia si cambia la presión exterior, pudiendo incluso a desaparecer dicha mezcla. Esto ocurre porque la temperatura de ebullición depende de la presión exterior.

En los grandes complejos petroquímicos, la destilación azeotrópica es utilizada desde decenios, siendo todavía el procedimiento más actual en el tratamiento de disolventes termolábiles no miscibles con agua e impurificados con contaminantes líquidos.

- h. Destilación extractiva.-** la destilación extractiva es una técnica utilizada para separar mezclas binarias azeotrópicas, en la que se adiciona un agente de separación o solvente, cuya característica principal es que no presenta la formación de azeótropos con ninguno de los componentes de la mezcla a separar.

El solvente altera de manera conveniente las volatilidades relativas de los componentes de la mezcla, por tal razón debe tener baja volatilidad para asegurar su permanencia en la fase líquida, además, para garantizar el contacto con la mezcla a lo largo de toda la columna debe tener un punto de ebullición superior al de los componentes a separar y se debe adicionar en una de las etapas cercanas al condensador, por encima de la etapa de mezcla azeotrópica.



**Figura 16.** Diagrama de flujo simplificado para proceso de destilación extractiva.

La configuración típica para un proceso de destilación extractiva es mostrado en la **Figura 16**, en la cual se separan metil ciclohexano y tolueno. Estos dos componentes no forman un azeótropo, pero su volatilidad relativa es menos que 1,01 a bajas composiciones de tolueno. La volatilidad relativa de metil ciclohexano a tolueno es aumentada por la adición de un solvente. Esto permite la separación de estos dos componentes en menores etapas que las requeridas en destilación simple.

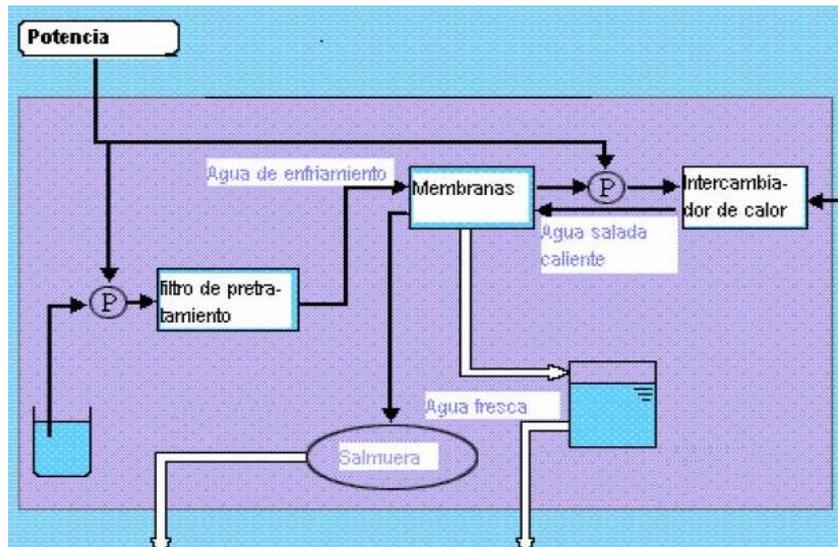
El solvente elegido es menos volátil que cualquiera de los dos componentes y, en razón a mantener una alta concentración de solvente a lo largo de toda la columna, debe introducirse a la columna de destilación extractiva por encima del plato de alimentación.

- i. **Destilación por membranas.**- esta es una técnica por membrana (las membranas son las películas finas de material poroso que se pueden utilizar para varias separaciones químicas, aunque muchas membranas se hacen de las películas del polímero, también pueden estar hechas de cerámica, de fibra de carbón, y de sustratos metálicos con poros. Los poros pueden medirse en dimensiones atómicas (< 10 angstrom) hasta 100+ micrones.), que involucra transporte de vapor de agua a través de los poros de una membrana hidrofóbica debido a la fuerza que ejerce la presión de vapor provista por la temperatura y/o la diferencia de concentración del soluto a través de la membrana.

En este método, las superficies de las membranas están en contacto directo con dos fases líquidas, una solución caliente y una fría. Como ha sido entendido, hay una diferencia de temperaturas pero el equilibrio térmico está bien establecido. Este método está basado en un flujo a contracorriente de un fluido con diferentes temperaturas. La corriente de entrada de agua de mar fría fluye a través de un condensador de paredes no permeables. Este sistema trabaja con un par de tubos, un condensador y un evaporador.

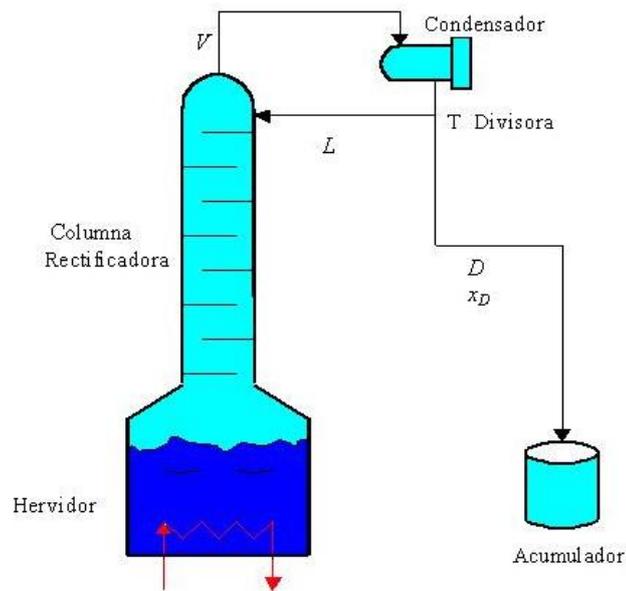
Estos tubos están separados por un hueco de aire. La pared del evaporador está hecha de una membrana hidrofóbica. Las membranas recomendadas son aquellas con un 60-80% de porosidad y un tamaño de poro de  $0.1-0.5 \times 10^{-6}$  m. vapor de agua puro pasa a través de las membranas, mientras los sólidos (sales, minerales, etc.) se quedan del otro lado de la membrana.

Como fue mencionado, la diferencia de temperaturas de los fluidos, generan una diferencia de presión de vapor, la cual, obliga al vapor para que pase a través de los poros de la membrana del tubo del evaporador y este se condensa en el hueco de aire, de esta forma el calor es parcialmente recuperado.



**Figura 17.** Diagrama de flujo de la destilación por membrana.

- j. Destilación por lotes o Batch.-** en las destilaciones por lotes, llamadas también batch, se carga al equipo una determinada cantidad de la mezcla de interés para que, durante la operación, uno o más compuestos se vayan separando de la mezcla original. Un ejemplo común corresponde a las destilaciones que ocurren en los laboratorios, donde el líquido es vaciado en un recipiente y calentado hasta hervir. El vapor formado se retira continuamente por condensación, que corresponde al compuesto más volátil.



**Figura 18.** Columna de destilación por lotes con rectificación.

En las separaciones por lotes no hay estado estable y la composición de la carga inicial cambia con el tiempo. Esto trae consigo un incremento en la temperatura del recipiente y decremento en la cantidad de los componentes menos volátiles a medida que avanza la destilación.

La destilación por lotes se utiliza en los siguientes casos:

- Cuando la capacidad requerida es tan pequeña que no permite la operación continua a una velocidad práctica. Las bombas, boiler, tuberías y equipos de instrumentación generalmente tienen una capacidad mínima de operación industrial.
- Los requerimientos de operación fluctúan mucho con las características del material alimentado y con la velocidad de procesamiento. El equipo para operación por lotes generalmente tiene mayor flexibilidad de operación que los que operan en forma continua. Esta es la razón por la cual predomina el equipo de operación por lotes en plantas piloto.
- La destilación intermitente se utiliza también cuando la mezcla a separar tiene un alto contenido de sólidos. El uso de una unidad por lotes puede mantener a los sólidos separados y permitir que se remuevan fácilmente al final del proceso.

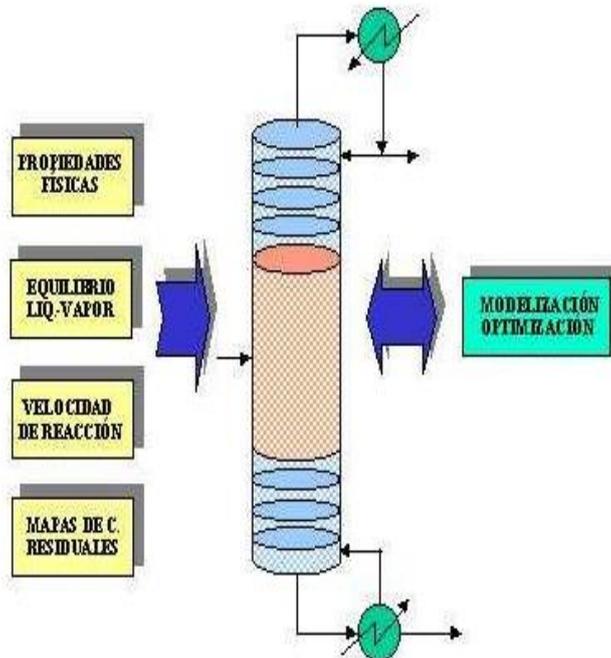
**k. Destilación reactiva.-** permite llevar a cabo una transformación química simultáneamente con la separación de los componentes a contracorriente que resultan de ésta y una zona superior e inferior de separación. Además, este tipo de operación permite, en muchos casos, el rompimiento de azeótropos, incrementar la conversión de algunos sistemas reactivos, así como la reducción de costos de inversión y operación al llevar a cabo dos operaciones en un mismo equipo.

La aplicación más importante de la destilación reactiva, hoy en día, es para sistemas reactivos en los cuales el equilibrio químico afecta la conversión a los productos de interés por la presencia de éste y otros productos secundarios.

En estos casos, este proceso permite la separación de estos componentes desplazando el equilibrio hacia una mayor conversión del producto deseado.

Entre las aplicaciones de la destilación reactiva se encuentran:

- Separación de ácido láctico por hidrólisis del Lactato de Metilo.
- Síntesis de Tetrahidrofurano (THF).
- Síntesis de Butilacetato.
- Hidrólisis del Acetato de Metilo.
- Producción de Fenol y Acetona a partir de Hidroperóxido de Cumeno.



**Figura 19.** Diagrama de destilación reactiva.

## 7.5.8. ACERO INOXIDABLE<sup>13</sup>

### 7.5.8.1. Definición

El acero inoxidable es una aleación de hierro y carbono que contiene por definición un mínimo de 10,5% de cromo. Algunos tipos de acero inoxidable contienen además otros elementos aleantes. Los principales son el níquel y el molibdeno. Es un tipo de acero resistente a la corrosión, el cromo que contiene posee gran afinidad por el oxígeno y reacciona con él formando una capa pasivadora que evita la corrosión del hierro contenido en la aleación. Sin embargo, esta película puede ser afectada por algunos

<sup>13</sup> <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3319/4/55868-4.pdf>

ácidos dando lugar a un ataque y oxidación del hierro por mecanismos ínter granulares o picaduras generalizadas.



**Figura 20.** Bobinas de acero inoxidable corrugado.

### 7.5.8.2. Estructura de acero

Las propiedades físicas de los aceros y su comportamiento a distintas temperaturas dependen sobre todo de la cantidad de carbono y de su distribución en el hierro. Antes del tratamiento térmico, la mayor parte de los aceros son una mezcla de tres sustancias: ferrita, perlita y cementita. La ferrita, blanda y dúctil, es hierro con pequeñas cantidades de carbono y otros elementos en disolución.

La cementita, un compuesto de hierro con el 7% de carbono aproximadamente, es de gran dureza y muy quebradiza. La perlita es una profunda mezcla de ferrita y cementita, con una composición específica y una estructura característica, y sus propiedades físicas son intermedias entre las de sus dos componentes.

La resistencia y dureza de un acero que no ha sido tratado térmicamente depende de las proporciones de estos tres ingredientes. Cuanto mayor es el contenido en carbono de un acero, menor es la cantidad de ferrita y mayor la de perlita: cuando el acero tiene un 0,8% de carbono, está por completo compuesto de perlita. El acero con cantidades de carbono aún mayores es una mezcla de perlita y cementita.

Al elevarse la temperatura del acero, la ferrita y la perlita se transforman en una forma alotrópica de aleación de hierro y carbono conocida como austenita, que tiene la propiedad de disolver todo el carbono libre presente en el metal. Si el acero se enfría despacio, la austenita vuelve a convertirse en ferrita y perlita, pero si el enfriamiento es repentino la austenita se convierte en martensita, una modificación alotrópica de gran dureza similar a la ferrita pero con carbono en solución sólida.

### **7.5.8.3. Ventajas al usar acero inoxidable**

Los aceros inoxidables son más resistentes a la corrosión y a las manchas de los que son los aceros al carbono y de baja aleación. Este tipo de resistencia superior a la corrosión se produce por el agregado del elemento cromo a las aleaciones de hierro y carbono.

La mínima cantidad de cromo necesaria para conferir esta resistencia superior a la corrosión depende de los agentes de corrosión.

Las principales ventajas del acero inoxidable son:

- Alta resistencia a la corrosión.
- Alta resistencia mecánica.
- Apariencia y propiedades higiénicas.
- Resistencia a altas y bajas temperaturas.
- Buenas propiedades de soldabilidad, mecanizado, corte, doblado y plegado.
- Bajo costo de mantenimiento.
- Reciclable.
- Como consecuencia de diferentes elementos agregados como níquel, cromo, molibdeno, titanio, niobio y otros, producen distintos tipos de acero inoxidable, cada uno con diferentes propiedades.

## **CAPÍTULO II**

### **8. MARCO METODOLÓGICO**

#### **8.1. METODOLOGÍA**

La metodología aplicada para el desarrollo de éste tema de tesis comprende varios campos de la investigación científica, entre los cuales los principales son el método inductivo y el método experimental, siendo los básicos utilizados durante la realización del éste importante equipo de operaciones unitarias.

Con la aplicación del método inductivo se ha realizado un análisis minucioso y acertado de la información concerniente a la destilación, y las dos operaciones unitarias básicas que intervienen en el proceso como son: la evaporación y la condensación. Teniendo de esta manera una visión y conocimientos más amplios y necesarios para poder construir el equipo, con la utilización de éste método se logró establecer parámetros con los cuales se deberá trabajar y sobre todo los elementos con los cuales estará constituido el equipo.

En base a parámetros establecidos, buscamos los materiales necesarios para la construcción del equipo, cotizando precios en diversas casas comerciales de la ciudad con el fin de obtener materiales de excelente calidad con las características óptimas para garantizar la vida útil del equipo.

El método experimental fue fundamental después de la construcción del equipo, ya que mediante este método por medio de varios experimentos, se llegó a determinar las condiciones óptimas de funcionamiento del equipo de acuerdo a la sustancia de la cual se va a obtener el destilado; de ésta manera se podrá realizar varias prácticas de laboratorio las mismas que serán de gran utilidad para los estudiantes, debido a la gran aportación de conocimientos mediante la utilización del e quipo.

#### **8.2. TIPO DE ESTUDIO**

La demostración práctica de las actividades o procesos realizados en un trabajo tiene un papel fundamental en su desarrollo, ya que es la forma que se obtiene los datos que sirven para el análisis de tales procesos.

A través del análisis de estos datos podremos calificar si el proceso o actividad se ha desarrollado de manera correcta, si tiene sentido el seguir un lineamiento preestablecido o buscar otro que reemplace al anterior para obtener mejores resultados; nos permite observar la evolución del proceso en sus diferentes etapas, comprobar si el proceso cumple con los objetivos planteados; determinar si la estructura, el material o los métodos de análisis escogidos son los más idóneos para el proceso.

El muestreo, es una de las actividades más importantes dentro del desarrollo de un trabajo, ya que éste nos permite obtener los datos, los cuales, luego de ser tabulados y analizados demostrarán:

- Las características iniciales del material de investigación, o con el cual se va a trabajar.
- Permite controlar el proceso durante sus etapas.
- Permite obtener las características finales del producto y así determinar que tan eficiente es el sistema desarrollado para dicho proceso.

### 8.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Variable	Concepto	Indicador	Técnicas	Instrumentos
Diseño	Consiste en una especulación ideadora de la resolución de un producto, un proyecto o una necesidad a futuro	Porcentaje de eficiencia. Porcentaje de Cumplimiento.	Medición. Análisis. Interpretación.	Planos.
Construcción	Se designa con el término de construcción a aquel proceso que supone el armado de cualquier cosa básica en algo complejo	Porcentaje de eficiencia. Porcentaje de Cumplimiento.	Matriz de Evaluación y control	Herramientas. Materiales.
Selección de Materiales	Se denomina selección a la técnica de tomar o elegir una o más cosas entre otras	Calidad	Análisis. Interpretación. Control	Catálogos.

**Tabla 6.** Operacionalización de variables

### 8.4. DISEÑO DEL EVAPORADOR

#### 8.4.1. Requerimientos de la cámara de ebullición

Dentro de los requerimientos establecidos, se ha decidido que el equipo tenga una producción de 4 litros de agua destilada por lote, este lote de producción tendrá una duración 30 minutos aproximadamente tanto en la cantidad como en el tiempo; además de esto se plantea que el volumen de trabajo de la cámara de ebullición sea de unos 60 litros por lote.

Por lo expuesto, se presentan a continuación los cálculos correspondientes para lograr los parámetros antes mencionados:

#### 8.4.2. Cálculo de la altura del cilindro

Se establece un diámetro de 40 cm debido al espacio que va a ser necesario para colocar una resistencia de 30 cm de longitud, la cual será de 6000 watts a 220 V.

Partimos de:

$$n = 400 \text{ mm}$$

$$V = 60 \text{ L}$$

Fórmula:

$$V = \frac{\pi * D^2 * H}{4}$$

$$H = \frac{V * 4}{\pi * D^2}$$

$$H = \frac{60 * 4}{3.1416 * (400\text{mm})^2}$$

$$H = 47.7\text{mm}$$

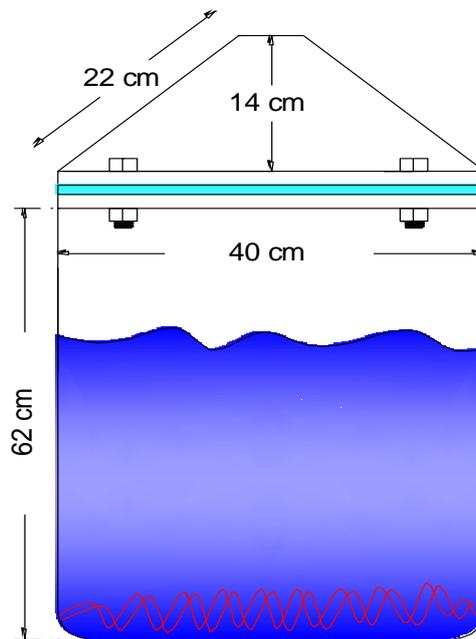
Donde:

V = volumen (capacidad del cilindro)

D = Diámetro del cilindro

H = altura del cilindro

A esta altura de 43 cm se le aumentará 20 cm, espacio necesario para colocar una canastilla en la cual se introducirán hojas aromáticas para extraer esencias esenciales.



**Figura 21.** Cilindro de almacenamiento de agua.

#### 8.4.3. Volumen real de trabajo

Partimos de:

$$n = 400 \text{ mm}$$

$$H = 480 \text{ mm}$$

Volumen máximo (V):

$$V = \frac{\pi * D^2 * H}{4}$$

$$V = \frac{3.1416 * (400\text{mm})^2 * 480\text{mm}}{4}$$

$$V = 59\text{litros}$$

Volumen mínimo ( $V_1$ ):

$$V_1 = \frac{\pi * D^2 * H}{4}$$

$$V_1 = \frac{3.1416 * (400mm)^2 * 120mm}{4}$$

$$V_1 = 15litros$$

Volumen real aprovechado en el proceso de destilación ( $V_r$ ):

$$V_r = V - V_1$$

$$V_r = 59litros - 15litros$$

$$V_r = 44litros$$

## 8.5. CONSTRUCCIÓN DEL DESTILADOR

### 8.5.1. Materiales, equipos y EPP

Los materiales, equipos y equipo de protección personal que fueron necesarios para la construcción de éste equipo, son los que se detalla a continuación:

#### a. Materiales

- 2 planchas de acero inoxidable de 2 mm de espesor.
- ½ Malla de acero inoxidable.
- 4 metros de tubo rectangular para la base del equipo.
- 1 litro de pintura acrílica para pintar la base del destilador.
- 2 libras de electrodos.
- 10 Lijas de diferente numeración.
- 8 Pernos de ½ pulgada para afirmar los componentes del equipo a la base.
- Juego de ruedas.
- 4 metros de cable para la conexión a energía 220V.

- Enchufe y toma corriente.

**b. Equipos**

- Amoladora.
- Taladro de mesa.
- Taladro de mano.
- Soldadora eléctrica.
- Compresor con su respectiva pistola y pulverizador.
- Cámara fotográfica.

**c. Herramientas**

- Flexómetro.
- Escuadra.
- Rayador.
- Brocas.
- Cepillo de acero.
- Martillo.
- Mesa de trabajo.

**d. Elementos del equipo**

- Tablero de mando o panel de control.
- Manómetro.
- Resistencia eléctrica.
- Termómetro digital.
- Termocupla.
- Bomba centrífuga.
- Tubería de PVC
- Codos y uniones.
- Empaques y seguros.
- Llaves by-pass.

**e. Equipos de protección personal**

- Máscara para soldar.
- Mascarilla multitas o medicara.
- Guantes de cuero largos.
- Mandil de cuero.
- Protección auditiva, orejeras o tapones.
- Gafas.

### 8.5.2. Construcción de la cámara de ebullición

De acuerdo a las experiencias y bibliografías, se encontró que uno de los mejores diseños para evaporadores es que estos tengan una base cóncava; pero en nuestro caso no es importante construir la cámara de ebullición con una base cóncava, ya que en su interior va una resistencia de 6000 Watts, por lo que se optó por el diseño de una estructura con superficie cónica.

De acuerdo a las condiciones de diseño, para la construcción del cilindro, se traza las medidas correspondientes sobre una plancha de acero inoxidable de 2mm de espesor, se realiza los cortes con la cortadora de plasma, luego lo cual se procede a su respectivo doblado con la dobladora, para darle la forma cilíndrica y finalmente se la liga con soldadura.



**Figura 22.** Cilindro del caldero



**Figura 23.** Estructura del caldero

Para la superficie cónica delineamos las medidas para el diámetro requerido sobre la plancha de acero inoxidable, cortamos y con la amoladora se da la inclinación adecuada para posteriormente soldarla. La base se trabaja en el torno para obtener el diámetro requerido.

En el interior del caldero o cámara de ebullición consta con una malla en la que se va a colocar algunas hojas aromáticas y tallos de los cuales se extraerá su esencia, por medio de la destilación por arrastre de vapor.

### 8.5.3. Construcción de la cámara de condensación o intercambiador de calor

La cámara de condensación o intercambiador de calor fue construido en forma cilíndrica, en acero inoxidable de 2mm de espesor en forma de cilindro, no es forma de serpentín por la complejidad y costos de construcción; los resultados obtenidos de la destilación son iguales usando serpentín que por conductos como es el caso de éste equipo, el mecanismo para condensar en los dos casos es el mismo, ya que el vapor circula en una tubería interna y se procede a recircular refrigerante en una camisa en la que internamente contiene los tubos con el fin de condensar el vapor.

Para la condensación a la entrada de la cámara tiene una tubería de 1 ¼ plg de diámetro la misma que permite la entrada del vapor, al interior de la cámara tiene 4 tuberías de un diámetro de ¼ plg en las cuales se va a producir el cambio de estado del material de vapor a líquido permitiendo al final del trayecto la salida del condensado por medio de una tubería de 1 plg de diámetro.



**Figura 24.** Estructura interna del intercambiador



**Figura 25.** Estructura del intercambiador de calor

El intercambiador de calor tiene dos acometida la primera es por donde ingresara el fluido (refrigerante) y en el otro extremo es la salida del refrigerante este refrigerante será almacenado en un tanque reservorio.

Para la recirculación del refrigerante es indispensable la utilización de una bomba centrífuga la cual nos va permitir bombear en sentido contrario al flujo y así condensar el vapor que existe en la parte interna de las cuatro tuberías.

#### 8.5.4. Construcción y ensamble del soporte

Para la construcción del soporte, se lo realizó de acuerdo a las medidas establecidas tanto de la cámara de ebullición como de la cámara de condensación; ya que es indispensable contar con un soporte especialmente de la cámara de condensación o intercambiador de calor, por que el largo de ésta es de 1.20m; además, por el material que está construido debe necesariamente contar con un soporte.

En vista de que se necesita contar con tablero eléctrico de control, hemos optimizado espacio y recursos al construir dicho tablero en el soporte de la cámara de condensación; el mismo que consta de un paro de emergencia que servirá para ejecutar un paro repentino y drástico por fallas del sistema.



**Figura 26.** Soporte y panel de control

Consta de dos switch, uno para controlar la bomba y otra para controlar la resistencia, cuenta con un controlador de temperatura el mismo que sirve para establecer la temperatura a la cual va a ebullición el líquido que se encuentra en la cámara de ebullición además, por medio de este dispositivo se controla el cambio de temperatura que genera la resistencia.

#### **8.5.5. Construcción y ensamble del tanque de almacenamiento**

Para la construcción del tanque de almacenamiento del refrigerante, se consideró varios parámetros, como son el material adecuado para que no se corra con el fluido que va a ser contenido.

Se consideró la cantidad óptima de refrigerante que deberá recircular por el intercambiador de calor con el fin de que éste no se caliente con facilidad, para que cumpla con la función para la cual se lo utiliza como es el de enfriar el vapor que pasa por los conductos pequeños en el intercambiador de calor, y así obtener el destilado requerido en la práctica de laboratorio.



**Figura 27.** Tanque de almacenamiento y bomba centrífuga

El tanque fue elaborado con acero inoxidable, cuenta con una base sobre la cual se colocó la bomba centrífuga que sirve para recircular el refrigerante y ésta se encuentra con acoples que sirven para conectar al intercambiador de calor; el mismo que tiene una capacidad útil de 60 litros para evitar que se caliente con facilidad el refrigerante y ya no enfríe el vapor, no siendo posible obtener el destilado.

#### **8.5.6. Construcción y ensamble de la base móvil del equipo**

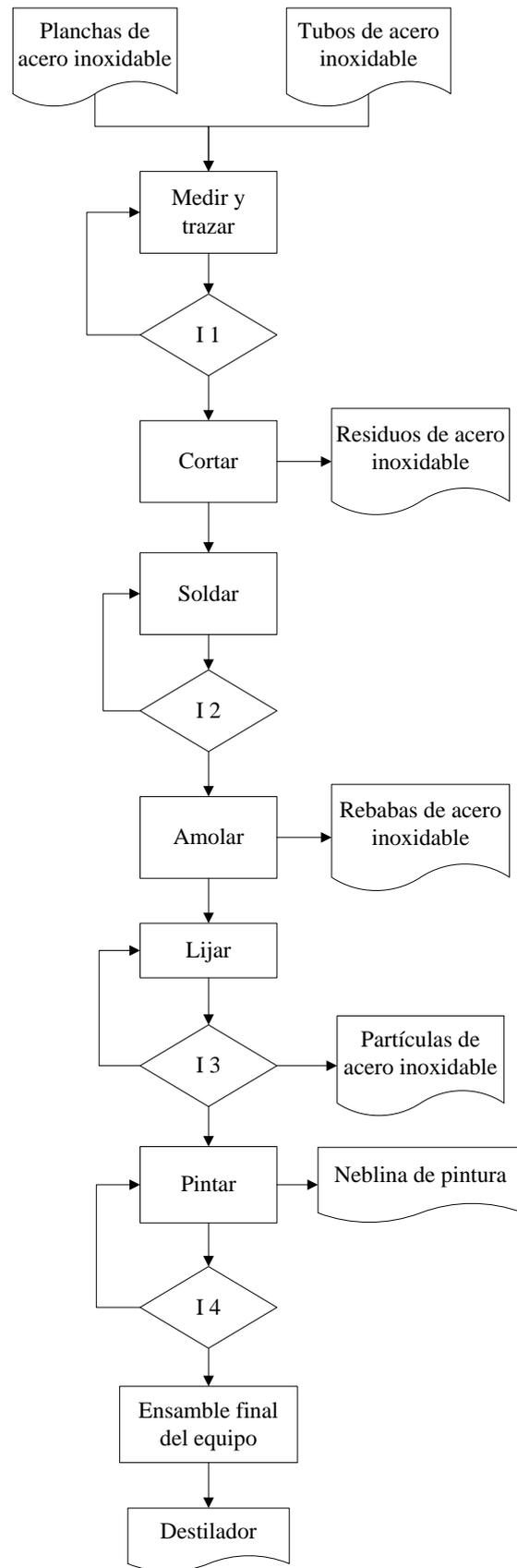
Contar con una base en la cual se encuentre empotrada cada una de las partes que forman el destilador, es de gran ayuda para su transportación, ya que cuenta con ruedas facilitando su manejo siendo un equipo de considerable tamaño y peso.

Para la construcción de la base se consideró las medidas del equipo armado, ya que debe ser exacta su distribución de cada una de las partes.

Al ya estar construida la base, se colocó los elementos del destilador en dicha base con el fin de obtener un solo equipo armado y movilizar fácilmente de un lugar a otro.

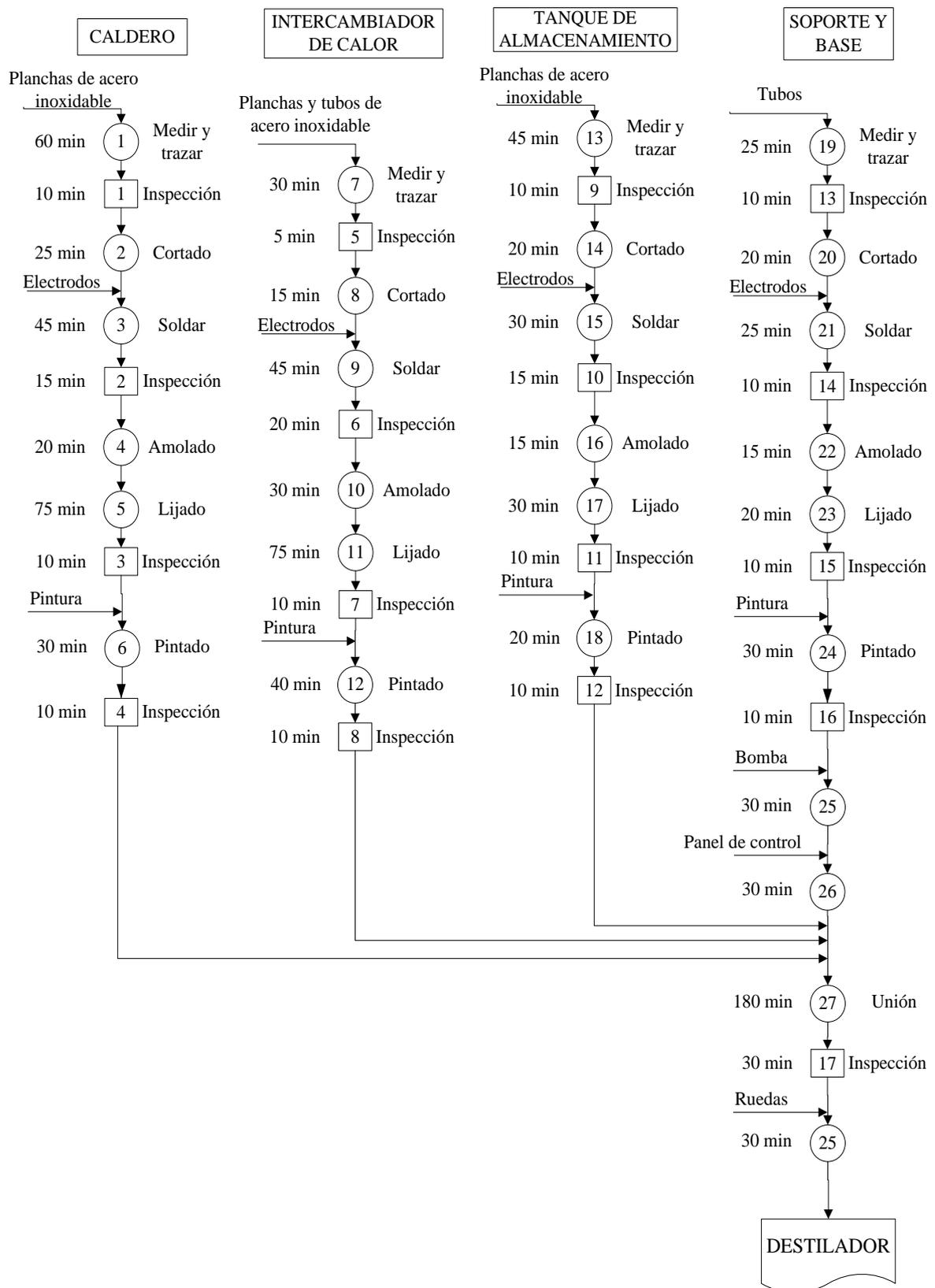
#### **8.5.7. Operaciones para la construcción del destilador**

- **Medir y trazar.-** con las medidas establecidas para cada una de las partes, se procede a medir las planchas de acero, tubos; trazando en cada uno de ellos definiendo las medidas, esta operación se realiza con las siguientes herramientas de trabajo: flexómetro, escuadra y rayador.
- **Cortar.-** luego de medir y rayar los tubos mencionados se procede a cortar para lo cual utilizamos un arco de sierra con su respectiva sierra.
- **Soldar.-** se procede a unir las partes del soporte y ponerles un punto de suelda en cada unión con la finalidad de tener armado el soporte para posteriormente con la ayuda de una escuadra y un nivel proceder a soldar las uniones.
- **Amolar.-** esta operación consiste en retirar la rebaba de la parte que fue soldada, tratando de sacar todo el residuo metálico del contacto del electrodo con el metal soldado; se lo realiza con una amoladora manual.
- **Lijar.-** este proceso se lo realiza con la lija # 100 tratando de retirar parte sobrante o pintura del tubo original para que el fondo antes del pintado agarre de mejor manera en el metal.
- **Pintado.-** en este proceso utilizamos primeramente la pintura anticorrosiva para fondear toda la parte a ser pintada, y luego aplicamos la pintura de color gris.



**Figura 28.** Diagrama de flujo del proceso de construcción del destilador.

Donde I, son inspecciones realizadas para dar la aprobación de la parte del equipo.



**Figura 29.** Diagrama de operaciones de construcción del destilador

### 8.5.8. Equipo construido

Una vez realizado la construcción de las diferentes partes que componen el destilador y al unir las mismas, el equipo es como se muestra en la Figura 30, además se puede observar con detalle en el ANEXO 1.



**Figura 30.** Equipo construido (DESTILADOR).

El destilador consta de las siguientes partes:

1. Caldero o cámara de ebullición.
2. Intercambiador de calor o cámara de condensación.
3. Tanque de recirculación con refrigerante.
4. Bomba centrífuga.
5. Resistencia eléctrica.
6. Termocupla.
7. Panel de control.
8. Soporte.

*Caldero o cámara de condensación.*- el mismo que tiene una capacidad máxima de 59 litros, en su interior se encuentra una resistencia de 6000 watts, la cual sirve para calentar el fluido que se encuentra en el interior del caldero. Posee además una

termocupla que sirve para determinar la temperatura a la cual se encuentra el fluido. Cuenta con una malla, la misma que se encuentra en la parte superior al nivel máximo del fluido, el funcionamiento de ésta malla es para colocar las plantas para obtener esencias.

*Intercambiador de calor o cámara de condensación.*- consta de cuatro tuberías las mismas que tienen como funcionalidad el separar el vapor por los ductos para optimizar la condensación, los ductos son recubiertos por una camisa hermética; por la cual fluye a contraflujo el refrigerante para condensar el vapor. El intercambiador tiene un ángulo de inclinación de 5°, con el fin de facilitar el desfogue del condensado.

*Tanque de recirculación con refrigerante.*- éste tanque sirve para recircular el refrigerante con el cual se enfría el vapor para poder condensarlo, el sentido de flujo del refrigerante es en contraflujo con el fin de que salga frío el condensado final. Se construyó para recircular por el uso del refrigerante, para que el sistema funcione se utilizó una bomba centrífuga, ésta cuenta después de su descarga con una llave de paso para regular el flujo del líquido a recircularse.

*Soporte.*- sirve como base para el intercambiador de calor y a la vez permite que se encuentre ubicado el panel de control.

El panel de control consta de los siguientes elementos:



**Figura 31.** Panel de control.

*Controlador de temperatura.*- en éste dispositivo podremos controlar la temperatura a la cual va a evaporarse el fluido contenido en el caldero, regulando así que no sobrepase la temperatura establecida ni se disminuya la misma. La termocupla pasa la información a este elemento y activa o desactiva el funcionamiento de la resistencia.

### 8.5.9. Recursos humanos

A continuación se detalla los recursos humanos para la construcción de un destilador:

- ✓ Dos egresados de la Facultad de Ingeniería de la Escuela Industrial.
- ✓ Director de tesis de la UNACH.
- ✓ Asesor de tesis de la UNACH.
- ✓ Técnico en construcción industrial.
- ✓ Técnico electrónico.

## 8.6. ANÁLISIS DE COSTOS

### 8.6.1. Costo de inversión

A continuación se desglosa los materiales y equipos que se utilizaron para la fabricación del equipo:

<b>LISTA DE MATERIALES</b>			
<b>DETALLE</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR UNITARIO (\$)</b>	<b>COSTO (\$)</b>
Plancha de acero inoxidable	3	150.00	450.00
Resistencia eléctrica	2	60.00	120.00
Encendido y apagado	1	28.00	28.00
Paro de emergencia	1	35.00	35.00
Termómetro digital	1	250.00	250.00
Bomba centrífuga	1	270.00	270.00
Manómetro analógico	1	25.00	25.00
Termocupla	1	15.00	15.00
		<b>SUBTOTAL (\$)</b>	<b>1193.00</b>
		<b>IVA 12 %</b>	<b>143.16</b>
		<b>TOTAL (\$)</b>	<b>1336.16</b>

**Tabla 7.** Costo de inversión.

### 8.6.2. Costo de operación

Para estimar el cálculo del costo de operación es importante conocer las condiciones de operación del equipo:

<b>DETALLE</b>	<b>COSTO (\$)</b>
Construcción del tanque de evaporación	450.00
Intercambiador de calor	225.00
Construcción del tanque de almacenamiento del agua	60.00
Construcción del soporte	25.00
Construcción de la base	25.00
SUBTOTAL (\$)	785.00
IVA 12%	94.20
TOTAL (\$)	879.20

**Tabla 8.** Costo de operación.

### 8.6.3. Costos indirectos

Para el funcionamiento del equipo de destilación, es necesario el uso de los siguientes materiales y ensayos para verificar la pureza del producto final:

<b>Detalle</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor unitario (\$)</b>	<b>Sub-total (\$)</b>
Ensayo físico – químico del agua cruda	1	22.00	22.00
Ensayo físico – químico del agua destilada	1	22.00	22.00
Ensayo físico – químico del jugo de caña	1	22.00	22.00
Ensayo físico – químico del alcohol obtenido	1	22.00	22.00
Refrigerante (l)	50	2.50	125.00
		Sub-total (\$)	213.00
		IVA 12 %	25.56
		Total (\$)	238.56

**Tabla 9.** Costos indirectos.

#### 8.6.4. Costo total

El costo total es la suma de los tres costos.

$$\text{Costo total} = \text{costo de inversión} + \text{costo de operación} + \text{costo indirecto}$$

$$\text{Costo total} = (1336.16 + 879.20 + 283.56) \text{ dólares}$$

$$\text{Costo total} = 2453.92 \text{ dólares.}$$

### 8.7. PARTE EXPERIMENTAL

#### 8.7.1. Muestreo

Para realizar la práctica de laboratorio es necesario establecer los puntos de muestreo dentro del sistema de destilado, para lo cual el procedimiento se lo puede evidenciar en el ANEXO 2.

#### 8.7.2. Formato de prácticas de laboratorio

Para la validación del equipo se ha realizado pruebas piloto, las mismas que han sido basadas en el siguiente formato:

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

## FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

### *LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS*

**TEMA: DESTILACIÓN DE AGUA**

**Práctica N° 01**

**Grupo N° \_\_\_\_\_**

**Catedrático de la asignatura: \_\_\_\_\_**

**Fecha: \_\_\_\_\_**

**Integrantes: \_\_\_\_\_**

---

---

### INFORMACIÓN

#### 1. INTRODUCCIÓN

#### 2. OBJETIVOS

##### 2.1. Objetivo general

##### 2.2. Objetivo específicos

#### 3. MATERIALES

#### 4. SUSTANCIA

#### 5. EQUIPO

**6. DIAGRAMA DEL EQUIPO** (debe ser dibujado por el estudiante).

**7. PROCEDIMIENTO**

**8. MARCO TEÓRICO** (consulta para el estudiante).

**9. TOMA DE MUESTRA**

<b>TIEMPO (min)</b>	<b>CANTIDAD (ml)</b>	<b>CAUDAL (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>
5	10		
10	10		
15	10		
20	10		
25	10		
30	10		

**10. CÁLCULOS**

**11. CONCLUSIONES**

**12. RECOMENDACIONES**

**BIBLIOGRAFÍA**

**ANEXOS**

## CAPÍTULO III

### 9. RESULTADOS

#### 9.1. RESULTADOS DE LA PRÁCTICA DE DESTILACIÓN DE AGUA

Al realizar la práctica de laboratorio de la destilación de agua se obtuvo los siguientes resultados:

##### 9.1.1. Cálculo del caudal

###### a. Instrumentos utilizados

- Recipiente con volumen conocido.
- Cronómetro.

###### b. Procedimiento

Poner el recipiente de capacidad conocida en la caída del fluido y tomar el tiempo que tarda en llenarse.

###### c. Cálculos

$$Q = \frac{V}{t} \quad (14)$$

Donde:

- Q: caudal
- V: volumen
- t: tiempo

Al realizar la práctica, se obtuvo:

- Volumen del condensado (V) = 500 cm<sup>3</sup>
- Tiempo que demora en llenar (T) = 6min

---

<sup>14</sup> TIPPENS, Física Básica, México, Edit. McGraw Hill. 1991. Primera edición en español, pág. 308

Reemplazando valores obtenemos el caudal:

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$Q = \frac{500\text{cm}^3}{6\text{min}}$$

$$Q = 83.33 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} * \frac{1\text{min}}{60\text{seg}}$$

$$Q = 1.38 \frac{\text{cm}^3}{\text{seg}}$$

### 9.1.2. Calor suministrado por la resistencia

La resistencia que se encuentra en el sistema, para calentar el fluido es de 6000 Watts.

$$Q_s = Pr \quad (15)$$

Donde:

Qs: calor suministrado

Pr: potencia de la resistencia

Conociendo que un watt es igual a un J/seg, reemplazando y realizando conversiones, tenemos:

$$Q_s = Pr$$

$$Q_s = 6000\text{watts}$$

$$1\text{watt} = 1 \frac{\text{J}}{\text{seg}}$$

---

<sup>15</sup> KENNETH WARK – DONALD E. RICHARDS, Termodinámica, Madrid, Edit. McGraw Hill. 2001. Sexta Edición, pág. 253

$$Q_s = 6000 \frac{J}{seg} * \frac{KJ}{1000J} * \frac{3600seg}{1h}$$

$$Q_s = 21600 KJ/h$$

### 9.1.3. Balance de masas o rendimiento

#### a. Datos necesarios

- Cantidad inicial de sustancia (**Cin**) = 59 litros de agua.
- Cantidad final de la sustancia contenida en el caldero después de la destilación (**Cfin**) = 35 litros.
- Cantidad consumida en el proceso de destilación (**Ccon**).

#### b. Cálculos

- **Cantidad consumida de la sustancia**

$$Ccon = Cin - Cfin$$

$$Ccon = 59l - 35l$$

$$Ccon = 24l$$

- **Cantidad de destilación total de la sustancia**

- Cantidad consumida de la sustancia (**Ccon**)
- Tiempo de destilación (**t<sub>des</sub>**)
- Cantidad de condensado obtenido (**CH<sub>2</sub>O**)

$$(Ccon) = 24l$$

$$(t_{des}) = 30min$$

$$CH_2O = 4.25l \text{ ó } 4250cm^3$$

- **Cálculo de la cantidad de destilación que se va a obtener con 44 litros**

4.25l	24l
<b>X</b>	44l

$$X = \frac{44l * 4.25l}{24l}$$

$$X = 7.79l$$

- **Cálculo del tiempo de destilación**

24l	30min
44l	<b>X</b>

$$X = \frac{44l * 30min}{24l}$$

$$X = 55 \text{ min} + 50 \text{ min}$$

$$\mathbf{X = 105 \text{ min}}$$

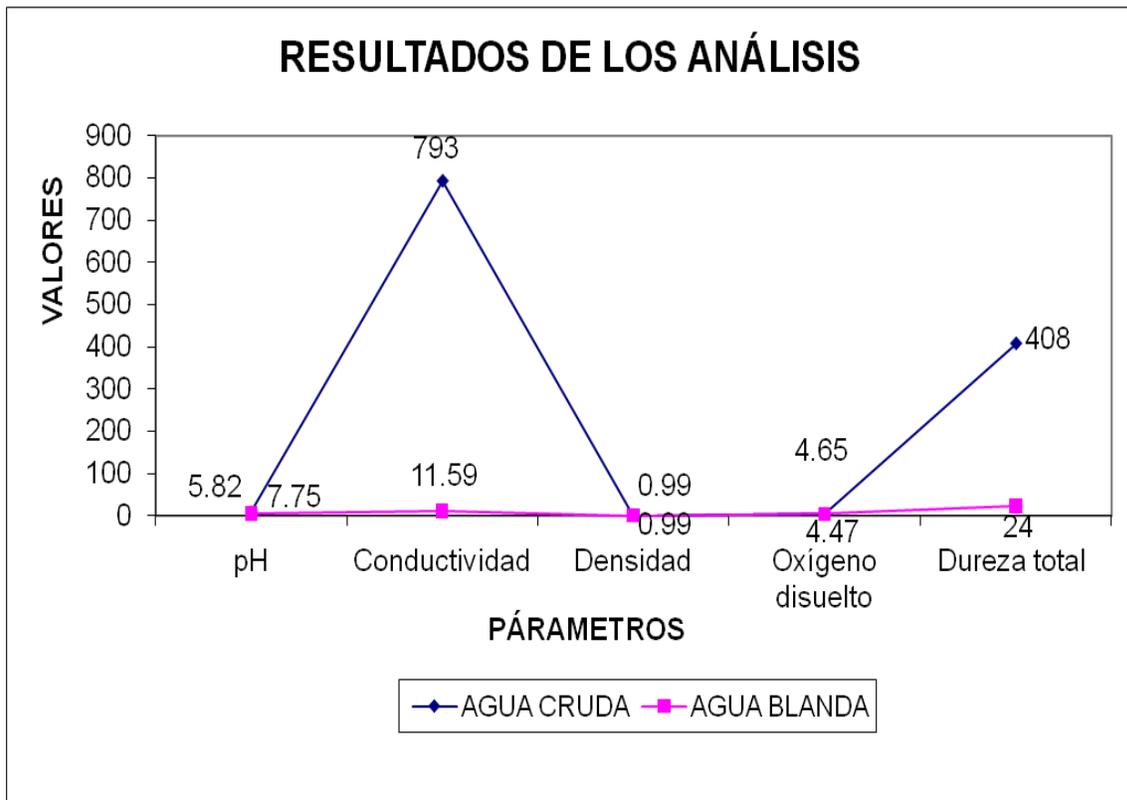
**Nota:** a esta cantidad se le sumará el tiempo que se demora en evaporarse y posteriormente condensarse, el tiempo es de 50 min.

#### 9.1.4. Resultados del análisis de laboratorio del agua cruda y agua blanda

Los resultados obtenidos en los análisis físicos – químicos del agua cruda como del agua blanda, se visualizará de una mejor manera en el ANEXO 3 y ANEXO 4 respectivamente; a continuación se presenta una tabla resumida de los datos:

PÁRAMETROS	UNIDADES	RESULTADOS DEL AGUA CRUDA	RESULTADOS DEL AGUA BLANDA
pH	$H^+$	7.75	5.82
Conductividad	$\mu S / cm$	793	11.59
Densidad	$g / ml$	0.99	0.99
Oxígeno disuelto	$mgO_2 / l$	4.47	1.65
Dureza total	$mgCaCO_3 / l$	408	24

**Tabla 10.** Resultados de la prueba del agua cruda y agua blanda.



**Figura 32.** Resultado del análisis del agua.

#### 9.1.5. Eficiencia

Para el cálculo de eficiencia es necesario conocer las entalpías correspondientes según la temperatura en cada caso para lo cual, nos basaremos en el ANEXO 5. Constantes termodinámicas del vapor de agua húmedo.

$$Q = (M_C * H_C) + (M_V * H_V) - (M_A * H_A) \quad (16)$$

Donde:

$Q$ :	calor aprovechado
$M_C$ :	masa del concentrado
$H_C$ :	entalpía del concentrado
$M_V$ :	masa del evaporado
$H_V$ :	entalpía del evaporado
$M_A$ :	masa de la alimentación
$H_A$ :	entalpía de la alimentación

Para determinar la entalpía en cada caso debemos conocer la temperatura a la cual se encuentran las masas, teniendo en ciertos casos que interpolar los datos en base al ANEXO 5:

- $H_C$  : entalpía del concentrado

Por lo obtenido en la práctica de laboratorio, se conoce que la temperatura con la que salió el concentrado fue de 20°C, obteniendo según la tabla una entalpía de 92.2 kJ/kg.

- $H_V$  : entalpía del evaporado

La temperatura a la cual se evaporó el agua fue de 93°C, al no contar con un valor directo en el ANEXO 6, se procederá a interpolar los datos con la siguiente fórmula:

---

<sup>16</sup> KENNETH WARK – DONALD E. RICHARDS, Termodinámica, Madrid, Edit. McGraw Hill. 2001. Sexta Edición, pág. 280

TEMPERATURA (°C)	ENTALPÍA (kJ/kg)
92	385.4
93	X
93.51	391.7

$$X = \frac{(Y - Y_1)(X_2 - X_1)}{Y_2 - Y_1} + X_1$$

Donde:

- X: valor que vamos a determinar
- Y: valor que conocemos, y no se encuentra en la tabla
- $Y_1$ : valor anterior de temperatura
- $Y_2$ : valor posterior de temperatura
- $X_1$ : valor anterior de entalpía
- $X_2$ : valor posterior de entalpía

Reemplazando valores tenemos:

$$X = \frac{(93^\circ\text{C} - 92^\circ\text{C}) * \left( 391.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 385.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)}{93.51^\circ\text{C} - 92^\circ\text{C}} + 385.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$X = 389.57 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- $H_A$ : entalpía de la alimentación

La temperatura del agua en su estado inicial fue de 16°C, y su entalpía es de 67.1 kJ/kg.

Para el cálculo conocemos el volumen, para transformar a masa, tenemos la siguiente fórmula:

$$m = \delta * V$$

Donde:

- $m$ : masa  
 $\delta$ : densidad (0.99g/ml)  
 $V$ : volumen

- Masa del concentrado, volumen 7.79 litros ó 7790ml.

$$m = \delta * V$$

$$m = \left( 0.99 \frac{g}{ml} * 7790ml \right) * \left( \frac{1kg}{1000g} \right)$$

$$m = 7.71kg$$

- Masa del evaporado, volumen 44 litros ó 44000 ml.

$$m = \delta * V$$

$$m = \left( 0.99 \frac{g}{ml} * 44000ml \right) * \left( \frac{1kg}{1000g} \right)$$

$$m = 43.56kg$$

- Masa de la alimentación, volumen 59 litros ó 59000 ml.

$$m = \delta * V$$

$$m = \left( 0.99 \frac{g}{ml} * 59000ml \right) * \left( \frac{1kg}{1000g} \right)$$

$$m = 58.41kg$$

Como datos tenemos:

$$M_c : 7.71 \text{ kg}$$

$$H_C : \quad 92.2 \frac{kJ}{kg}$$

$$M_V : \quad 43.56 \text{ kg}$$

$$H_V : \quad 389.57 \frac{kJ}{kg}$$

$$M_A : \quad 58.41 \text{ kg}$$

$$H_A : \quad 67.1 \frac{kJ}{kg}$$

Reemplazando valores en la fórmula, tenemos:

$$Q = (M_C * H_C) + (M_V * H_V) - (M_A * H_A)$$

$$Q = \left( 7.71 \frac{kg}{h} * 92.2 \frac{kJ}{kg} \right) + \left( 43.56 \frac{kg}{h} * 389.57 \frac{kJ}{kg} \right) - \left( 58.41 \frac{kg}{h} * 67.1 \frac{kJ}{kg} \right)$$

$$Q = 13761.22 \frac{kJ}{h}$$

La fórmula para calcular la eficiencia es:

$$\eta = \left( \frac{Q}{Q_s} \right) * 100 \quad (17)$$

Donde:

$\eta$  : eficiencia

$Q$  : calor aprovechado

$Q_s$  : calor suministrado por la resistencia

Reemplazando valores, tenemos:

---

<sup>17</sup> KENNETH WARK – DONALD E. RICHARDS, Termodinámica, Madrid, Edit. McGraw Hill. 2001. Sexta Edición, pág. 255.

$$\eta = \left( \frac{Q}{Q_s} \right) * 100$$

$$\eta = \left( \frac{13761.22 \frac{kJ}{h}}{21600 \frac{kJ}{h}} \right) * 100$$

$$\eta = 63.71\%$$

## 9.2. RESULTADOS DE LA PRÁCTICA DE ALCOHOL

Al realizar la práctica de laboratorio de la destilación de alcohol del jugo de caña fermentado; nos basamos en la Norma INEN 2015 Bebidas Alcohólicas Control de Añejamiento (ANEXO 6), Norma INEN 1837 Bebidas Alcohólicas Licores (ANEXO 7), Norma INEN 347 Bebidas Alcohólicas Determinación de Metanol (ANEXO 8), obteniendo los siguientes resultados:

### 9.2.1. Cálculo del caudal

#### a. Instrumentos utilizados

- Recipiente con volumen conocido.
- Cronómetro.

#### b. Procedimiento

Poner el recipiente de capacidad conocida en la caída del fluido y tomar el tiempo que tarda en llenarse.

#### c. Cálculos

$$Q = \frac{V}{t}$$

Donde:

Q: caudal  
V: volumen  
t: tiempo

Al realizar la práctica, se obtuvo:

- Volumen del condensado (V) = 500 cm<sup>3</sup>
- Tiempo que demora en llenar (T) = 15min

Reemplazando valores obtenemos el caudal:

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$Q = \frac{500\text{cm}^3}{15\text{min}}$$

$$Q = 33.33 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} * \frac{1\text{min}}{60\text{seg}}$$

$$Q = 0.55 \frac{\text{cm}^3}{\text{seg}}$$

### 9.2.2. Calor suministrado por la resistencia

La resistencia que se encuentra en el sistema, para calentar el fluido es de 6000 Watts.

$$Q_s = Pr$$

Donde:

Q<sub>s</sub>: Calor suministrado  
Pr: potencia de la resistencia

Conociendo que un watt es igual a un J/seg, reemplazando y realizando conversiones, tenemos:

$$Q_s = Pr$$

$$Q_s = 6000 \text{watts}$$

$$Q_s = 6000 \frac{J}{\text{seg}} * \frac{KJ}{1000J} * \frac{3600 \text{seg}}{1h}$$

$$Q_s = 21600 \text{KJ}/h$$

### 9.2.3. Balance de masas o rendimiento

#### a. Datos necesarios

- Cantidad inicial de sustancia (***Cin***) = 51 litros de agua.
- Cantidad final de la sustancia contenida en el caldero después de la destilación (***Cfin***) = 36 litros.
- Cantidad consumida en el proceso de destilación (***Ccon***) = 15 litros

#### b. Cálculos

- **Cantidad consumida de la sustancia**

$$Ccon = Cin - Cfin$$

$$Ccon = 51l - 36l$$

$$Ccon = 16l$$

- **Cantidad de destilación total de la sustancia**

- Cantidad consumida de la sustancia (***Ccon***)
- Tiempo de destilación (***tdes***)
- Cantidad de condensado obtenido (***CHOH***)

$$(Ccon) = 16l$$

$$(tdes) = 43.2min$$

$$CHOH = 1.8l \text{ ó } 1800cm^3$$

- **Cálculo de la cantidad de destilación que se va a obtener con 44 litros**

$$1800cm^3 \qquad 16l$$

$$X \qquad 44l$$

$$X = \frac{44l * 1800cm^3}{16l}$$

$$X = 4950cm^3 \text{ ó } 4.95 \text{ litros}$$

- **Cálculo del tiempo de destilación**

$$1800cm^3 \qquad 43.2min$$

$$4950cm^3 \qquad X$$

$$X = \frac{4950cm^3 * 43.2min}{1800cm^3}$$

$$X = 118.8 min + 50 min$$

$$X = 168.8 min$$

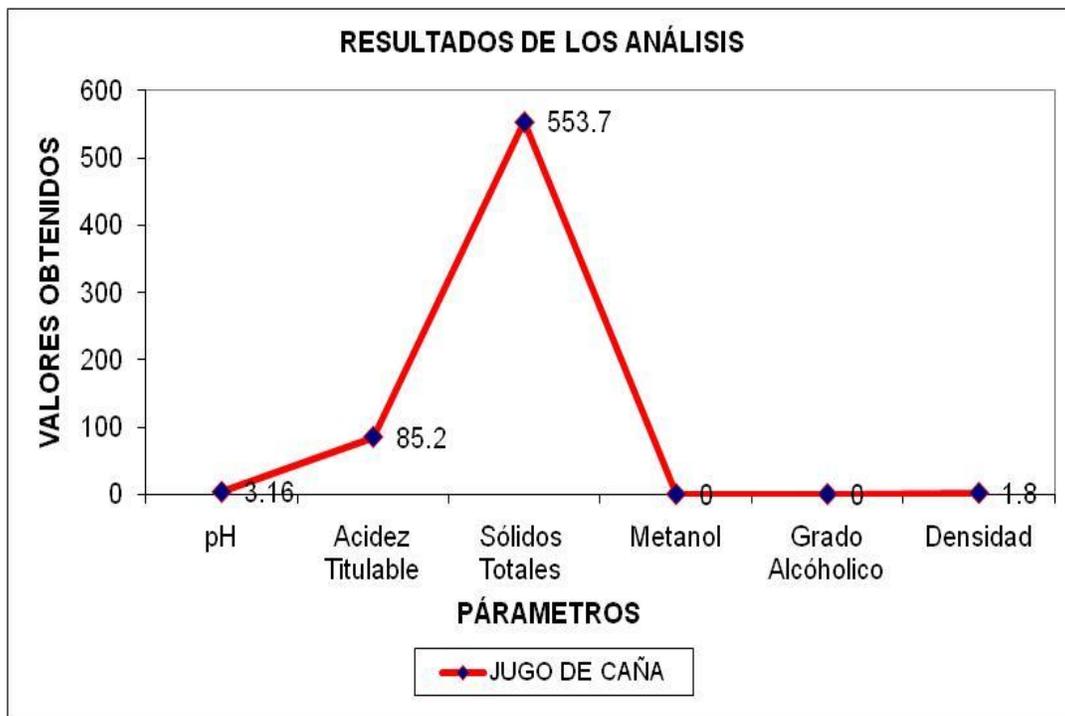
**Nota:** a esta cantidad se le sumará el tiempo que se demora en evaporarse y posteriormente condensarse, el tiempo es de 50 min.

#### 9.2.4. **Resultados del análisis de laboratorio del jugo de caña fermentado.**

Los resultados obtenidos en el análisis físico – químico del jugo de caña fermentado, se visualizará de una mejor manera en el ANEXO 9; a continuación se presenta una tabla resumida de los datos:

PÁRAMETROS	UNIDADES	JUGO DE CAÑA
pH	und	3.16
Acidez Titulable	mg/100ml	85.2
Sólidos Totales	mg/100ml	553.7
Metanol	%	0
Grado Alcohólico	%	0
Densidad	g/ml	1.8

**Tabla 11.** Resultados de la prueba jugo de caña fermentado.



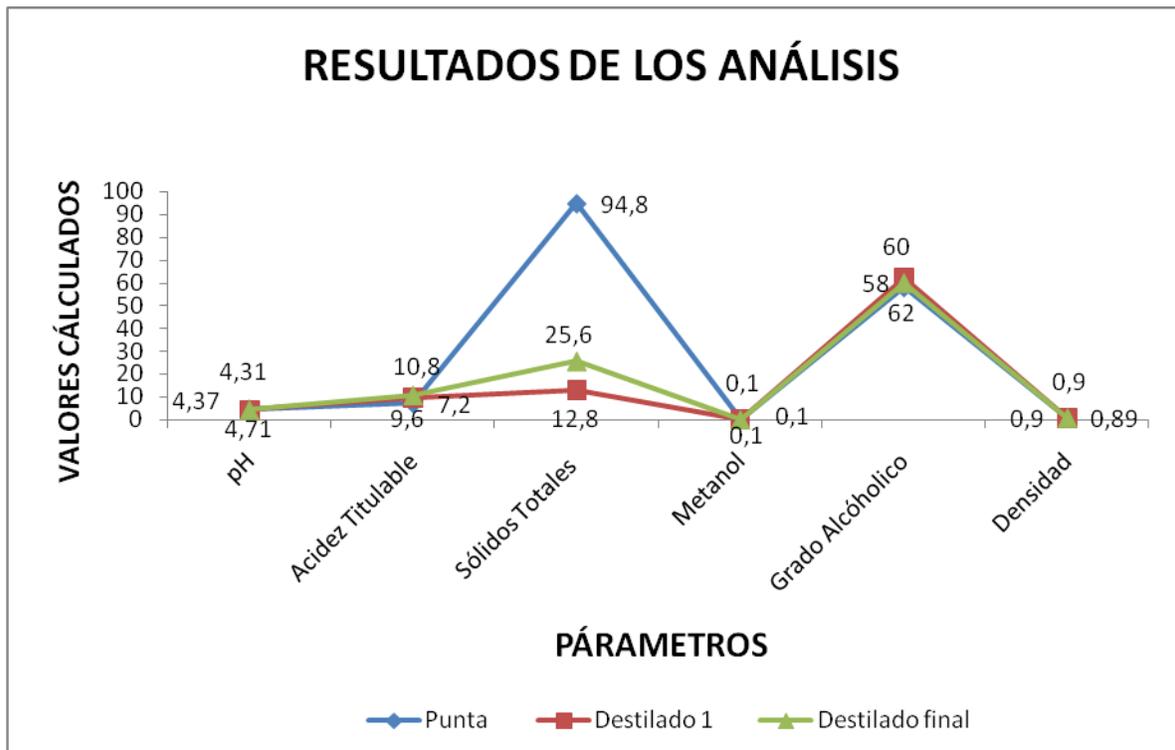
**Figura 33.** Resultado del análisis del jugo de caña fermentado.

#### 9.2.5. Resultados del análisis de laboratorio del condensado obtenido.

Los resultados obtenidos en los análisis físicos – químicos del condensado recolectado en diferentes tiempos de destilado, se podrá visualizar de una mejor manera en el ANEXO 10; a continuación se presenta una tabla resumida de los datos:

PÁRAMETROS	UNIDADES	Punta	Destilado 1	Destilado final
pH	und	4.71	4.37	4.31
Acidez Titulable	mg/100ml	7.2	9.6	10.8
Sólidos Totales	mg/100ml	94.8	12.8	25.6
Metanol	%	0.1	0.1	0.1
Grado Alcohólico	%	58	62	60
Densidad	g/ml	0.89	0.9	0.9

**Tabla 12.** Resultados del análisis del condensado.



**Figura 34.** Resultado del análisis del condensado.

## CAPÍTULO IV

### 10. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Al realizar los cálculos para determinar balance de masas, caudal, eficiencia del equipo, nos basamos en las pruebas de laboratorio realizadas para la verificación de la funcionalidad del equipo, al obtener el destilado se analizó los condensados obtenidos tanto de agua como de alcohol en diferentes tiempos; los cuales nos sirvieron para realizar una comparación entre el producto de entrada y el producto de salida u obtenido, teniendo lo siguiente:

- Al realizar los análisis físicos – químicos del agua cruda de la Facultad de Ingeniería, se obtuvo como resultados: pH  $7.75[H^+]$ , conductividad  $793 \frac{\mu S}{cm}$ , densidad  $0.99 \frac{g}{ml}$ , oxígeno disuelto  $4.47 \frac{mgO_2}{l}$ , dureza total  $408 \frac{mgCaCO_3}{l}$ ; estos resultados es la base con la que partimos y verificamos la confiabilidad de los resultados.
- Se realizaron pruebas para verificar el funcionamiento del equipo y se tomaron muestras para su respectivo análisis de laboratorio dando como resultado; pH  $5.82[H^+]$ , conductividad  $11.59 \frac{\mu S}{cm}$ , densidad  $0.99 \frac{g}{ml}$ , oxígeno disuelto  $1.65 \frac{mgO_2}{l}$ , dureza total  $24 \frac{mgCaCO_3}{l}$ .
- Se realizó pruebas de laboratorio del jugo de caña fermentado, del cual se obtuvo los siguientes resultados: pH  $3.16$ , acidez titulable  $85.2 \frac{mg}{100ml}$ , sólidos totales  $5537.8 \frac{mg}{100ml}$ , metanol 0% , grado alcohólico 0% , densidad  $1.8 \frac{g}{ml}$ ; siendo éstos valores la base para la verificación de resultados del condensado.

- Se realizaron pruebas destilando alcohol a partir del jugo de caña, los resultados están dentro de los rangos establecidos por las normas vigentes del INEN se pueden consumir si perjudicar su salud, como resultados se considera los de la destilación 1, debido a que es el alcohol que podrá ser ingerido, a 83 teniendo: pH 4.37und , acidez titulable  $9.6 \frac{mg}{100ml}$ , sólidos totales  $12.8 \frac{mg}{100ml}$ , metanol 0.1% , grado alcohólico 62% , densidad  $0.90 \frac{g}{ml}$ .
- Según los cálculos realizados se obtuvo 63.71%, de eficiencia del equipo.

En base a lo antes mencionado se verifica y constata la funcionalidad correcta del equipo, y se constata el múltiple uso que se le puede dar al destilar, usando como materia cruda, varias sustancias; de las cuales se obtendrá un destilado acorde a las necesidades.

## CAPÍTULO V

### 11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 11.1. CONCLUSIONES

- Para la inocuidad del producto destilado y garantizar la vida útil del equipo, se analizó varios materiales con los cuales se podría construir el destilador; siendo el acero inoxidable el material óptimo para la construcción del equipo usado en la totalidad de la estructura y partes del equipo.
- Para un desarrollo idóneo del equipo se estableció y obtuvo información necesaria de las dos operaciones unitarias que intervienen en el proceso de destilación, como son: la evaporación y transferencia de calor; operaciones básicas para el funcionamiento del equipo.
- Para el diseño del caldero o cámara de ebullición se partió de las necesidades de conocer los procesos que intervienen en la destilación de un fluido dichos procesos han sido impartidos en la cátedra de Operaciones Unitarias; por lo que se tomó como punto inicial el diámetro debido al espacio que va a ser utilizado por la resistencia y la altura, con estos valores se calculó el volumen con el que construyó el equipo. Este elemento tiene dos partes fundamentales cilindro y la cubierta esto nos permitirá dar un mantenimiento preventivo y a su vez realizar una limpieza interna, de esta manera conservaremos la vida útil del caldero.
- En el ensamble del equipo y partes del mismo, se observó una serie de fallas, las mismas que fueron corregidas durante la construcción del destilador.

- Al realizar los análisis físicos – químicos del agua cruda de la Facultad de Ingeniería, se obtuvo como resultados: pH  $7.75[H^+]$ , conductividad  $793 \frac{\mu S}{cm}$ , densidad  $0.99 \frac{g}{ml}$ , oxígeno disuelto  $4.47 \frac{mg O_2}{l}$ , dureza total  $408 \frac{mg CaCO_3}{l}$ ; estos resultados es la base con la que partimos y verificamos la confiabilidad de los resultados.
- Se realizaron pruebas para verificar el funcionamiento del equipo y se tomaron muestras para su respectivo análisis de laboratorio dando como resultado; pH  $5.82[H^+]$ , conductividad  $11.59 \frac{\mu S}{cm}$ , densidad  $0.99 \frac{g}{ml}$ , oxígeno disuelto  $1.65 \frac{mg O_2}{l}$ , dureza total  $24 \frac{mg CaCO_3}{l}$ .
- Se realizó pruebas de laboratorio del jugo de caña fermentado, del cual se obtuvo los siguientes resultados: pH  $3.16_{und}$ , acidez titulable  $85.2 \frac{mg}{100ml}$ , sólidos totales  $5537.8 \frac{mg}{100ml}$ , metanol 0% , grado alcohólico 0% , densidad  $1.8 \frac{g}{ml}$ ; siendo éstos valores la base para la verificación de resultados del condensado.
- Se realizaron pruebas destilando alcohol a partir del jugo de caña, como resultados se considera los de la destilación 1, debido a que es el alcohol que podrá ser ingerido, a 83 teniendo: pH  $4.37_{und}$ , acidez titulable  $9.6 \frac{mg}{100ml}$ , sólidos totales  $12.8 \frac{mg}{100ml}$ , metanol 0.1% , grado alcohólico 62% , densidad  $0.90 \frac{g}{ml}$ .
- Según los cálculos realizados se obtuvo 63.71%, de eficiencia del equipo.

## 11.2. RECOMENDACIONES

- Antes de iniciar las prácticas de laboratorio, se debe conocer los puntos de ebullición del fluido a destilar para obtener un correcto condensado.
- Se recomienda seguir el Manual de Operación y Mantenimiento del equipo, con el que se evitará que sufra algún desperfecto y se podrá cumplir con los objetivos planteados al momento de realizar las prácticas.
- Tomar en cuenta, en caso de que ocurra alguna anomalía, los puntos citados en el Manual de Operación y Mantenimiento, en la parte de Solución de Problemas, ya que es una guía importante para determinar las posibles fallas o la ocurrencia de fallo en el equipo.
- Para alcanzar un mayor grado de pureza de los condensados, recomendamos realizar una bi-destilación o rectificación del proceso.
- Se sugiere realizar un programa periódico de mantenimiento de equipo, asegurando así su vida útil.

## **CAPÍTULO VI**

### **12. PROPUESTA DE MEJORA**

#### **12.1. TÍTULO DE LA PROPUESTA**

##### **“AUTOMATIZACIÓN DEL DESTILADOR”**

#### **12.2. INTRODUCCIÓN**

Toda industria utiliza en sus procesos evaporadores, ya sean estos para producir energía o secar algún producto, se puede automatizar el destilador incrementando un variador de frecuencia para poder controlar el caudal y obtener mejor resultados en el producto terminado.

La automatización está orientada a determinar las formas más efectivas para utilizar los factores básicos de la producción: personas, maquinaria, materiales, información, energía, y ventilación con el fin de elaborar un producto o brindar un servicio.

El Ingeniero Industrial se distingue por la constante búsqueda del mejoramiento de la productividad y optimización en los sistemas de trabajo dentro de las empresas, lo cual abarca el diseño, implementación y administración de los sistemas de producción, y la calidad del producto.

El término automatización se refiere a una amplia variedad de sistemas y procesos que operan con mínima o sin intervención del ser humano, el alcance va más allá que la simple mecanización de los procesos, ya que ésta provee a operadores humanos mecanismos para

asistirlos en los esfuerzos físicos del trabajo, la automatización reduce ampliamente la necesidad sensorial y mental del humano.

### **Clases de automatización**

Hay tres clases muy amplias de automatización industrial: automatización fija, automatización programable, y automatización flexible.

- **Automatización fija**, se utiliza cuando el volumen de producción es muy alto y por tanto se puede justificar económicamente el alto costo del diseño de equipo especializado para procesar el producto o el servicio, con un rendimiento alto y tasas de producción incrementadas. Además de esto, otro inconveniente de la automatización fija es su ciclo de vida que va de acuerdo a la vigencia del producto en el mercado.
- **Automatización programable**, se emplea cuando el volumen de producción es relativamente bajo y hay una diversidad de producción a obtener. En este caso el equipo de producción es diseñado para adaptarse a las variaciones de configuración del producto; esta adaptación se realiza por medio de un programa (software).
- **Automatización flexible**, es más adecuada para un rango de producción medio. Estos sistemas flexibles poseen características de la automatización fija y de la automatización programable. Los sistemas flexibles suelen estar constituidos por una serie de estaciones de trabajo interconectadas entre sí por sistemas de almacenamiento y manipulación de materiales, controlados en su conjunto por una computadora.

Se considera de gran importancia la educación y adiestramiento estudiantil en materia de automatización debido a la necesidad de brindar un mejor sistema de producción y de confort a los trabajadores que estarán manipulando equipos similares, por lo que se plantea crear un sistema que permita la carga de fluido automáticamente.

## **12.3. OBJETIVOS**

### **12.3.1. Objetivo general**

## AUTOMATIZAR EL DESTILADOR

### 12.3.2. Objetivos específicos

- Determinar el nivel mínimo del fluido y por medio de éste activar sensores para volverlo a llenar hasta su nivel máximo.
- Evaluar la temperatura a la que sale el condensado.
- Implementar un variador de frecuencia necesario para regular el caudal de recirculación.
- Realizar suficientes prácticas para obtener más destreza y más conocimientos en la automatización.

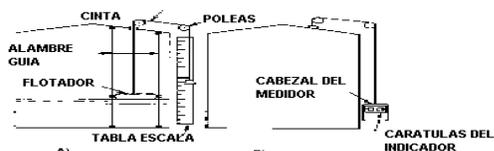
### 12.4. DESARROLLO DE LA PROPUESTA

Para facilitar el uso de equipo es necesario que se implemente algunos elementos en varias partes del sistema, para de esta manera optimizar el equipo; por ello hemos creído conveniente exponer una serie de propuestas que ayudarán a un mejor aprovechamiento del equipo.

El objetivo principal al realizar la mejora se centra en la automatización de equipo, ya que el llenado del fluido en el equipo actual se lo realiza manualmente; además no existe ningún dispositivo el cual nos permita verificar si el fluido a llegado a su nivel mínimo para que en el caso de que se requiera seguir destilando, se pueda seguir colocando más fluido.

Conocemos según cálculos realizados que el nivel mínimo del fluido contenido en el caldero para que pueda calentarse el mismo, es de 15 litros, pero con el sistema actual no podemos determinar a simple vista mencionado nivel de fluido, para dar solución a lo mencionado, existe un sinnúmero de posibilidades como son:

1. *Medidor de nivel flotante.*- Constituido por un flotador pendiente de un cable, un juego de poleas, y un contrapeso exterior.



A) Medidores de flotador y cinta.  
a) Indicador de tabla a escala.  
b) Medidor de lectura en tierra

**Figura 35.** Medidor de nivel flotante.

El funcionamiento de éste dispositivo es usado para determinar el nivel del fluido contenido en el interior del caldero, para poder realizar una retroalimentación automática del fluido al interior del caldero será necesario adicionar una serie de elementos, los mismos que servirán como receptores y emisores de información sobre el nivel del fluido en la caldera; siendo utilizados relés, bomba centrífuga y tanque de almacenamiento.

Si el material del flotante es plástico, no será posible su uso en el equipo, ya que al estar expuesto a altas temperaturas, éste no soportará la exposición al calor y se comenzará a derretir; razón por la cual no es posible su uso.



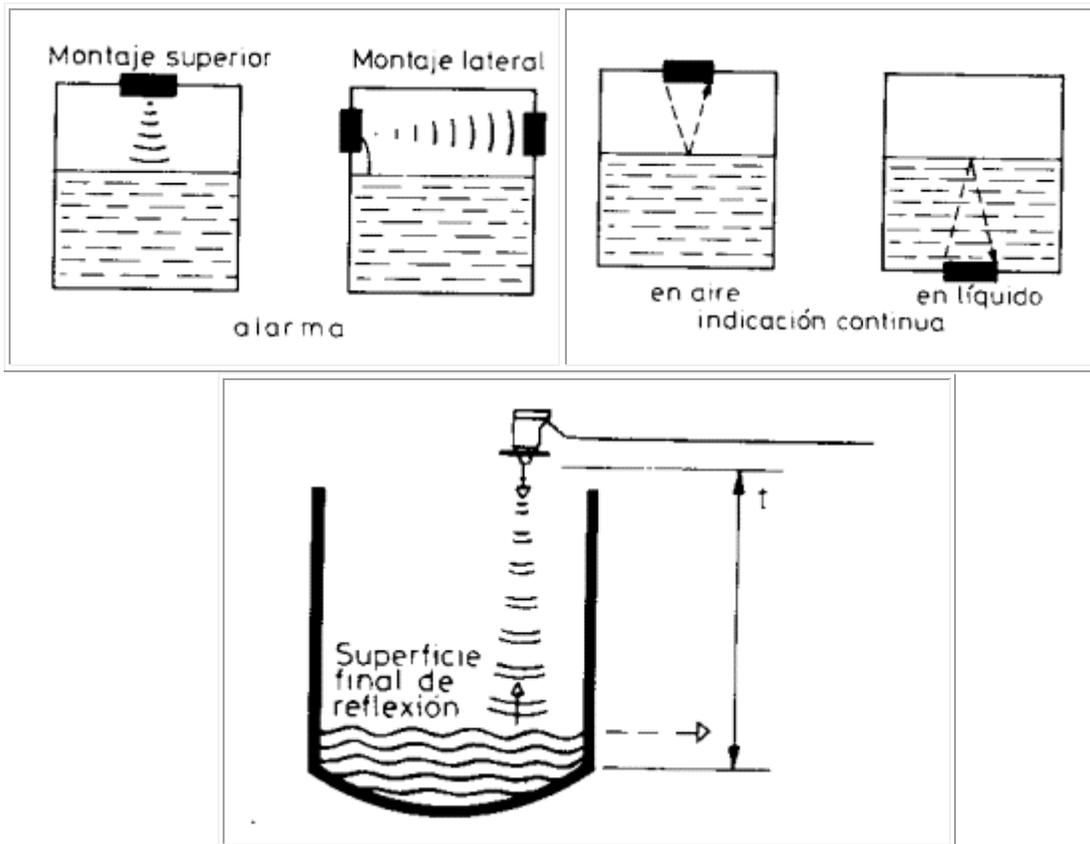
**Figura 36.** Flotador magnético.

Existe un flotante magnético que si es posible usar en el equipo y su costo sólo del flotante fluctúa entre 150 y 250 dólares; a esto se le adicionará los costos del relé, la

bomba centrífuga y el tanque de almacenamiento sumando entre estos tre un costo de 250 dólares aproximadamente.

2. *Sistema ultrasónico.*- El sistema ultrasónico de medición de nivel se basa en la emisión de un impulso ultrasónico a una superficie reflectante y la recepción del eco del mismo receptor. El retardo en la captación del eco depende del nivel del tanque.

Los sensores trabajan a una frecuencia de unos 20 khz. Estas ondas atraviesan con cierto amortiguamiento o reflexión del medio ambiente de gases o vapores y se reflejan en la superficie del sólido o del líquido.



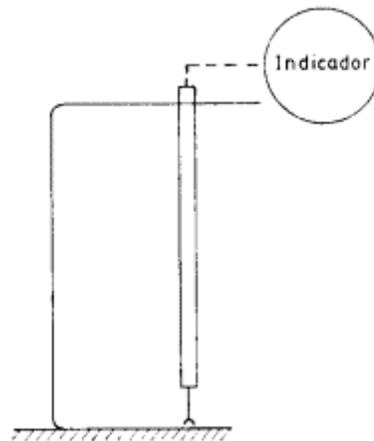
**Figura 37.** Sistema ultrasónico de medición de nivel.

Para el funcionamiento del sistema, cuenta con un relé que permite receptor la información. La información del sistema ultrasónico debe ser procesada en un

programador de proceso que es el dispositivo SAP-100, el mismo que cuenta ya con una programación interna en la que se encontrará el volumen con el que se encuentra el caldero pasando al relé esta información.

De la misma forma contará con una bomba centrífuga y un tanque de almacenamiento para poder retroalimentar el fluido al caldero, al contar todos los elementos que contiene éste sistema, el costo será más elevado que el medidor de nivel flotante.

3. *Medidor de nivel capacitivo.*- El medidor de nivel capacitivo consta de una varilla del medidor, la misma que se encontrará aislada y situada verticalmente en el tanque y bien asegurada mecánicamente para resistir la caída del fluido y las fuerzas generadas en los movimientos internos.



**Figura 38.** Esquema básico del medidor de nivel capacitivo.

Basándonos en los sistemas de medición de nivel antes mencionados, hemos decidido por costos, proponer el sistema de nivel capacitivo, ya que es un sistema en el que intervendrán los siguientes elementos para la implementación del control automático del nivel del fluido en el caldero:

- Dos electrodos de cobre (sensores)

- Un relé de 24v
- Una bomba centrífuga
- Un tanque de almacenamiento del fluido

Los electrodos serán colocados en el interior del caldero, uno a la medida del límite inferior y uno al límite superior de la cantidad de fluido que deberá encontrarse en el caldero para que el fluido pueda condensarse. Estos electrodos estarán conectados a un relé, el mismo que receptorá la información del nivel del líquido sensado de un electrodo a otro, este relé se encontrará conectado a una bomba centrífuga, la misma que es acoplada a un tanque de almacenamiento del fluido.



**Figura 39.** Relé de contacto.



**Figura 40.** Electrodo de cobre.



**Figura 41.** Bomba centrífuga.

Al estar conectado en serie estos dispositivos, permitirá el paso de información de los electrodos a los contactos del relé, el mismo que generará la orden a la bomba centrífuga del paso o no del fluido hacia el caldero (activado / desactivado), de ésta manera no será necesario esperar un tiempo prudente después de apagar el equipo y retirar los elementos del caldero, para determinar si existe aún fluido en el interior del caldero o si es necesario recargarlo, para continuar con el proceso de destilación.

El costo de este sistema se detalla a continuación:

<b>LISTA DE MATERIALES</b>			
<b>Detalle</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor unitario (\$)</b>	<b>Sub-total (\$)</b>
Electrodos de cobre (1.5 m)	1	40.00	40.00
Relé de 24V	1	20.00	20.00
Bomba centrífuga	1	80.00	80.00
Tanque de almacenamiento	1	110.00	110.00
sub-total (\$)			250.00
IVA 12 %			30.00
Total (\$)			280.00

El variador de frecuencia realizará la función de la llave de paso que contiene el sistema actual a la salida de la bomba centrífuga, pero el objetivo es automatizar el equipo por lo que creemos conveniente realizar ésta propuesta de mejora para el equipo.

Implementar un variador de frecuencia en el sistema de recirculación de refrigerante permitirá de una forma automática, regular el caudal que será suministrado al

intercambiador de calor, ya que de acuerdo al fluido que se destilará y de acuerdo al tiempo que se demorará en obtener el condensado, se podrá regular el flujo de refrigerante necesario para enfriar el vapor que se encuentra en los ductos pequeños al interior del intercambiador de calor.

Colocando un termómetro a la salida del condensado se podrá con exactitud establecer la temperatura a la cual se obtendrá el destilado. Siendo éste un método que servirá para poder realizar cálculos de intercambio de calor específicos para esta máquina, y poder darle un uso más al equipo.

Nuestra propuesta además de estar enfocada a la automatización del equipo, se centra también en el adiestramiento de los estudiantes, con respecto al uso del equipo con un conocimiento amplio de cada uno de los elementos en cuanto a su funcionamiento y manejo; para de esta manera darle un uso correcto y adecuado para así garantizar la vida útil y prolongarla si fuese necesario.

## **BIBLIOGRAFÍA:**

- ✓ TIPPENS, Física Básica, Madrid, Edit. McGraw Hill. 2001. Sexta Edición.
- ✓ KENNETH WARK – DONALD E. RICHARDS, Termodinámica, Madrid, Edit. McGraw Hill. 2001. Sexta Edición.

#### **INTERNET:**

- ✓ <http://www.aula21.net/Nutriweb/agua.htm>
- ✓ [http://www.calderasvapor.com/agua\\_calderas.htm](http://www.calderasvapor.com/agua_calderas.htm)
- ✓ <http://www.ingenieroambiental.com/?pagina=642>
- ✓ <http://www.textoscientificos.com/quimica/alcoholes>
- ✓ [http://www.salohogar.net/quimica/nomenclatura\\_quimica/Propiedades\\_alcoholes.htm](http://www.salohogar.net/quimica/nomenclatura_quimica/Propiedades_alcoholes.htm)
- ✓ <http://www.revolucionesindustriales.com/industrias-caseras/esencias.html>
- ✓ [http://depa.pquim.unam.mx/amyd/archivero/DEST\\_ARRASTRE\\_VAPOR\\_14215.pdf](http://depa.pquim.unam.mx/amyd/archivero/DEST_ARRASTRE_VAPOR_14215.pdf)
- ✓ [http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/tecnologia\\_evaporacion.asp](http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/tecnologia_evaporacion.asp)
- ✓ [http://es.wikipedia.org/wiki/Condensaci%C3%B3n\\_\(f%C3%ADsica\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Condensaci%C3%B3n_(f%C3%ADsica))
- ✓ [http://www.telecable.es/personales/albatros1/calor/transferencia\\_de\\_calor\\_07\\_intercambidores.htm](http://www.telecable.es/personales/albatros1/calor/transferencia_de_calor_07_intercambidores.htm)
- ✓ [http://www.alambiques.com/tecnicas\\_destilacion.htm](http://www.alambiques.com/tecnicas_destilacion.htm)
- ✓ <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3319/4/55868-4.pdf>