



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS QUÍMICAS Y AMBIENTALES

**“Diseño, Construcción y Puesta en Marcha de una Columna de
Destilación de Lecho Empacado para una Solución de Alcohol”**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

Previa la obtención del Título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presentado por:

ANDREA FERNANDA BARCIA QUIMÍ

NURY CAROLINA LEÓN MUNIZAGA

GUAYAQUIL - ECUADOR

2015

AGRADECIMIENTO

Nuestro agradecimiento en primer lugar a Dios, quien nos ha dado la confianza y sabiduría necesaria para lograr uno de nuestros mayores objetivos.

Muy especialmente a nuestra directora de tesis, Dra. Olga González, por su apoyo y esfuerzo. Deseamos reconocer su trabajo, dedicación y desinteresada colaboración en el desarrollo de esta tesis.

Al Sr. Arturo Palacios, por su paciencia, sus conocimientos y sobretodo su amistad.

Al Ing. Guillermo Cárdenas que fue gracias a su proyecto de curso que nos ayudó a desarrollar nuestra idea de tesis en la Unidad de Destilación.

DEDICATORIA

Kleber Barcia y Janeth Quimí, mis padres, por brindarme ese cariño y apoyo incondicional que me han permitido culminar mis estudios. Mis modelos a seguir como padres, esposos, profesionales y personas.

A mi hermana, por su paciencia y cariño brindado al momento de sobrellevar algún obstáculo, su sonrisa y su ayuda me permitieron continuar con este proyecto.

A toda mi familia, sin ellos no hubiese podido llevar a cabo esta experiencia.

A mis amigos y en especial a mi compañera de tesis, Nury porque sin ella esta experiencia no hubiera sido la misma, su carisma y actitud positiva nos permitió seguir adelante.

Andrea Barcia Q.

DEDICATORIA

A quién más habría de dedicarle este logro sino a mis padres, ellos que me han brindado su amor y su apoyo incondicional. A mi papá por ser un ejemplo de lucha y dedicación, a mi mamá por cuidarme siempre y ser la “Mamá más mala del mundo”.

A mis hermanos por ser parte importante en mi vida, a Maritza por ser un ejemplo de desarrollo profesional a seguir y a Luis Fernando por llenar mi vida de alegrías.

A Andrea por haber sido una excelente compañera de tesis y amiga, por haberme tenido la paciencia necesaria y sobre todo por hacer de su familia, una familia para mí.

Nury León M.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Ing. Carlos Balladares
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



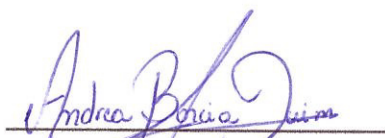
Dra. Olga González
DIRECTOR DE TESIS



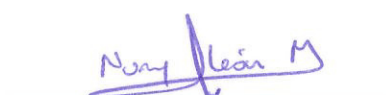
Ing. Pablo Tejada
VOCAL PRINCIPAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Trabajo de Graduación, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”
(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



Andrea F. Barcia Quimi



Nury C. León Munizaga

RESUMEN

El diseño, construcción y operación de una columna de destilación binaria de etanol – agua, como equipo de aprendizaje de los alumnos de la carrera de Ingeniería Química de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, brindó la oportunidad de aplicar los conocimientos adquiridos en Fenómenos de Transporte, Operaciones Unitarias, Diseño de Procesos, entre otros. El objetivo principal de esta tesis fue construir un equipo automatizado en el que se utilizaron termocuplas para ofrecer a los estudiantes la comodidad de tomar lecturas de temperaturas en un panel eléctrico y a su vez se permitió observar el nivel de la solución para el control del encendido de una resistencia. De tal manera que los estudiantes pudieron identificar los procesos que ocurren durante la operación unitaria de destilación de forma automática y manual en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Como paso previo a la construcción de la unidad de destilación, se procedió a simular el proceso en el software “Chemcad” con el fin de prever posibles errores y determinar las condiciones finales con las que actuaría la columna, además la simulación permite pasar de una escala piloto a una escala industrial.

El presente proyecto se basó en 4 etapas fundamentales: Diseño de la columna de relleno para un proceso de destilación con reflujo, para el

sistema binario etanol-agua y de los equipos auxiliares, simulación, construcción y operación de la unidad de destilación.

Como resultados se obtuvo que la columna está en la capacidad de tener una alimentación de $4 \text{ galones} \cdot \text{hora}^{-1}$ de mezcla etanol – agua. Las dimensiones de la columna son 3,94 pies de altura y un diámetro de 3,5", al estar trabajando con un diámetro tan pequeño se optó por usar un empaque de canicas en lugar de platos, claro está que no es el único factor que se tomaría en cuenta al momento de trabajar con una columna de empaque. Al estar tratando con una mezcla binaria alcohol – agua se nota que es una mezcla volátil y que por su diferencia en punto de ebullición se podrá obtener un alcohol concentrado en un lecho empacado, por otro lado el factor económico durante la construcción es algo que limito el trabajar con una columna de platos. Además de esto, el sistema cuenta con un calentador que opera por medio de una resistencia eléctrica y cuenta con un sensor de temperatura el cuál indicará a que temperatura se encuentra la solución a diferentes tiempos, de un intercambiador de calor de tubos y coraza, de tipo vertical trabajando en contracorriente para condensar el vapor de alcohol mediante un refrigerante de agua a temperatura ambiente. Las determinaciones del perfil térmico también es factible realizarlo en la posición media de la columna.

Se concluye que con este sistema de destilación se puede obtener alcohol al 94% Vol. en peso partiendo de una mezcla de etanol-agua al 20% Vol.,

conociendo que este tipo de mezcla binaria es azeotrópica con una limitante de 96% en peso de su concentración.

ABREVIATURAS

A	Área
ASTM	American Society for Testing Materials
BTU	British Thermal Units
c40	Cédula 40
c80	Cédula 80
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
HETP	Altura Equivalente a un Plato Teórico
INOX	Inoxidable
LOPU	Laboratorio de Operaciones Unitarias
MLDT	Media Logarítmica de Temperatura
P	Presión Manométrica
Pa	Presión Atmosférica
PSIA	Pounds per Square Inch Absolute
PSI	Pounds per Square Inch
PVC	Policloruro de vinilo

SIMBOLOGÍA

L-L:	Líquido – Líquido
PIB:	Producto Interno Bruto
K:	Kelvin
F:	Flujo molar de Alimentación
D:	Flujo molar de Destilado
B:	Flujo molar de Residuo
X_F :	Componente de Alimentación
X_D :	Componente de Destilado
X_B :	Componente de Residuo
L:	Flujo molar de Recirculación
R_D :	Razón de Reflujo
ρ_g :	Densidad del vapor
ρ_L :	Densidad del Líquido
T:	Temperatura
%:	Porcentaje
$^{\circ}\text{GL}$:	Grados Gay Lussac
%Vol.:	Porcentaje en Volumen
":	Pulgadas
atm:	Atmósfera
Re:	Número de Reynolds

Pr:	Número de Prantl
μ :	Viscosidad Dinámica
ρ :	Densidad
g:	Gravedad
h:	Altura
L:	Longitud
Q:	Calor
m:	Masa
C_p :	Calor Específico a Presión Constante
ΔT :	Diferencia de Temperatura
λ :	Entalpía de Vaporización
a:	Área
U_D :	Coeficiente de Transferencia Global
A_T :	Área de Transferencia
L_T :	Longitud de Tubos
n:	Número de pasos
d_i :	Diámetro Tubería Interna
D_e :	diámetro equivalente
N_t :	Número de Tubos
S:	Superficie por pie lineal
m :	metros

$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$:	Metros por segundo al cuadrado
Pa:	Pascal
%	Porcentaje
"	Pulgadas
Btu/h ft ²	BTU por hora-pie cuadrado- grados
°F	Grados Farenheit
°C:	Grados Celsius
K:	Temperatura Absoluta Kelvin
$\text{lb}\cdot\text{ft}^{-3}$:	Libra por pie cúbico
$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$:	Kilogramo por hora
$\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$:	Kilomol por hora
$\text{lbmol}\cdot\text{h}^{-1}$:	Libra mol por hora
$\text{lb}\cdot\text{h}^{-1}$:	Libra por hora
cm	centímetros
Cu	Cobre
cP	Centipoise
mm:	Milímetros
mPa-s:	Milipascal por segundo (Unidad de Viscosidad Dinámica)
g:	gramo

kg:	Kilogramo
kg/m ³ :	Kilogramo por metro cúbico
g/mol:	Gramo por mol
Kg/mm ²	Kilogramo por milímetros cuadrados
KJ/kg	Kilojoule por kilogramo
KJ/kg °C	Kilojoule por kilogramo - grados centígrados
KJ/h	Kilojoule por hora

Contenido

AGRADECIMIENTO	II
DEDICATORIA	III
DECLARACIÓN EXPRESA	VI
RESUMEN.....	VII
ABREVIATURAS	X
SIMBOLOGÍA.....	XI
INTRODUCCIÓN	XVII
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES.....	2
1. ANTECEDENTES	3
1.1 Justificación	7
1.2 Objetivos	10
1.3 Metodología Utilizada.....	11
1.4 Métodos.....	14
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	16
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1 Etanol	17
2.1.2 Mezclas Azeotrópicas	21
2.2 Unidad de Destilación.....	23
CAPÍTULO 3 SIMULACIÓN.....	47
3. DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA UNIDAD DE DESTILACIÓN	48
3.1 Simulación del Sistema.....	55
CAPÍTULO 4 CÁLCULOS Y RESULTADOS	63
4. CÁLCULOS Y RESULTADOS	64
4.1 Ecuaciones de Diseño y Cálculos para la Columna de Destilación.....	66
4.2 Ecuaciones de Diseño y Cálculos para el Condensador	73
4.3 Cálculos para Ubicación del Visor/Tanque Acumulador en el Sistema	80
CAPÍTULO 5.....	83
CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE LA UNIDAD DE DESTILACIÓN	83

5. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE LA UNIDAD DE DESTILACIÓN..	84
5.1 Construcción de la Unidad de Destilación.....	84
5.2 Construcción de la Estructura de Soporte.....	89
5.3 Instalación del Sistema Eléctrico	92
5.4 Instalación del Sistema Electrónico	93
5.5 Tuberías y Accesorios.....	95
5.6 Montaje de la Unidad de Destilación	96
5.7 Costos	100
CAPÍTULO 6.....	103
PRUEBAS DE OPERACIÓN DEL EQUIPO EFECTUADAS	103
6. PRUEBAS DE OPERACIÓN DEL EQUIPO EFECTUADAS.....	104
CAPÍTULO 7.....	111
MANUAL DE OPERACIÓN	111
7. MANUAL DE OPERACIÓN	112
7.1 MEMORIA TÉCNICA	120
7.1.3 CONDENSADOR.....	125
7.2 EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL.....	128
7.3 Mantenimiento Preventivo	130
7.4 Mantenimiento Correctivo	132
CAPÍTULO 8.....	134
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	134
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	135
8.1 Conclusiones	135
8.2 Recomendaciones.....	137
ANEXO A.....	139
ANEXO B.....	163

INTRODUCCIÓN

Las operaciones unitarias son una parte significativa en el estudio de la Ingeniería Química, cada una de ellas consiste en una serie de etapas con técnicas comunes que se repiten a lo largo de diferentes procesos de carácter físico. Estas se utilizan principalmente, para realizar las etapas físicas en la preparación de reactantes, separación de productos, transferencia de energía, entre otras aplicaciones.

Las operaciones unitarias se clasifican de acuerdo al tipo de transferencia, es así como dentro de las operaciones que transfieren masa se encuentra la destilación, que es el objeto de estudio de esta tesis. La destilación es una técnica usada ampliamente en la industria química para separar corrientes líquidas con dos o más componente en base a la mayor o menor volatilidad de los componentes de la mezcla, que es la diferencia básica con la operación unitaria de extracción L-L y se utiliza hoy en día en muchos procesos industriales, entre estos se tienen los procesos de refinación de petróleo o de producción de alcohol, etc. El alcohol se presenta como una alternativa económica y sustentable al combinarse con gasolina y usarse como biocombustible para vehículos automotores con motores de combustión interna en base a la generación de chispa. El tipo de alcohol a usar es el etanol, el cual se puede obtener de la destilación del jugo de

diversas frutas luego de que este ha sido fermentado por algún tiempo con el fin de dar paso a la formación de las moléculas de -OH .

El sistema de destilación permite obtener productos de gran pureza a partir de mezclas de dos o más componentes, las cuales se van a separar según su punto de ebullición, a su vez la destilación en lecho empacado presenta la ventaja de conseguir una mejor transferencia de masa y de contacto fase vapor líquido. Para obtener una mayor eficiencia del sistema se trabaja con una recirculación del producto que sale del tope de la columna y para tener un mayor control del mismo, se implementaron sensores y controladores en los distintos equipos que conforman la unidad de destilación.

El presente estudio para el diseño, construcción y operación de una columna de destilación binaria de lecho empacado consta de 8 capítulos fundamentales: Antecedentes que consiste en el análisis de estudios previos y en la justificación de porque se realiza el proyecto, Marco teórico en el cual se recopila toda la información necesaria para el desarrollo del presente proyecto tal como fórmulas o leyes aplicables, Simulación del proceso de destilación en donde se presenta un diagrama de la estructura y a su vez, se realiza la simulación de la operación usando el software "Chemcad" con el fin de tener una idea más clara del funcionamiento de la unidad de destilación en un entorno real, Cálculos y Resultados en el mismo que se desarrollan los cálculos de ingeniería indispensables para el diseño de la columna empacada y todos los equipos a utilizar, Construcción y Montaje de la Unidad

De Destilación se detallan los materiales e insumos que se han sido utilizados para construir la unidad de destilación, señalando también los costos en los que se ha incurrido, Pruebas se registran los resultados obtenidos en las múltiples pruebas experimentales realizadas además se definen los costos e inversión total que se realizó para llevar a cabo la consecución del logro, el penúltimo capítulo trata sobre la Operación del Equipo, Conclusiones y Recomendaciones.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1. ANTECEDENTES

La Destilación como operación unitaria, es utilizada ampliamente en procesos industriales en los cuales se requiere la separación de mezclas líquidas, en base a la volatilidad de sus componentes. El equipo o sistema de destilación a construir está sujeto a varios factores de diseño, entre ellos el tipo de mezcla que se requiere separar o la pureza del producto que se busca obtener.

Hoy en día, existen programas que facilitan el proceso de análisis de los parámetros de diseño ya que permiten conocer cuál sería el resultado si se afectan una o más variables. Cabe recalcar que a pesar de que la tecnología es de gran ayuda se debe de tener un punto de partida basado en los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera universitaria. Algunos de los parámetros que se han considerado prioritarios para cumplir con los objetivos planteados son: la altura de la columna, su diámetro y el tipo de empaque a utilizar. Al no ser tan frecuente el diseño de columnas de destilación empacadas, el estudio lo hace desde esta óptica.

La destilación o proceso de destilado tiene lugar en épocas antes del año 800 AC, tiempos en los que se decidió documentar el proceso utilizado para la producción de alcohol etílico partiendo desde la fermentación de la fruta hasta la separación del alcohol. En diferentes lugares del mundo

personas realizaban fermentos de cereales, frutas, leche, etc., y luego procedían a extraer un destilado de cada uno de ellos.

Con el transcurso del tiempo los productores de bebidas destiladas tenían varios secretos que les permitían obtener su producto con el sabor deseado para cada bebida y básicamente se enfocaban en el sistema de destilación montado, fue por este motivo que el proceso de destilación obtuvo diferentes tipos y funcionamientos a lo largo de la historia.

Hoy en día, las industrias realizan pruebas en distintos sistemas de destilación para obtener el producto deseado, cabe destacar que no sólo la industria de bebidas alcohólicas hace uso de esta operación sino también la industria de producción de cosméticos, farmacéutica, química y muchas otras. A pesar del avance tecnológico que se ha dado con el paso de los años, aún existen industrias que utilizan recipientes y sistemas rudimentarios para obtener bebidas como el brandy, lo anterior mencionado, destaca entre otras cosas la importancia y simplicidad de la operación en cuestión ya que puede tener lugar en una casa, en un laboratorio o en la industria a mayor escala.

Pero la destilación no es la única operación unitaria existente para la separación de mezclas líquidas, uno de los factores, diferente al técnico, a considerar, se basa en un análisis económico, en el que interviene el criterio de cada productor para tomar una decisión con respecto al proceso que se va a utilizar.

Una mezcla alcohol – agua es considerada como una mezcla azeotrópica, que indica que trabajando con una presión máxima y a una temperatura máxima solo se alcanzará una destilación del 96% en peso con respecto a su concentración, sin embargo es posible llegar a una concentración más alta tratando la mezcla con aditivos. Dependiendo del uso final que se le dé al concentrado se selecciona el tipo de operación unitaria con el que se trabaje para su separación y además de su factibilidad económica con respecto a una industria.

Existe una gran variedad de operaciones unitarias tales como extracción L-L, adsorción, evaporación, decantación, destilación, secado entre otras, de las cuales algunas de ellas son utilizadas para la separación de una mezcla alcohol – agua.

En tanto, a las operaciones mencionadas, una extracción líquido – líquido requiere de un mayor tratamiento para una solución de alcohol ya que el fundamento de su operación es la separación de componentes en base a la diferencia de solubilidad entre dos líquidos inmiscibles o parcialmente miscibles a diferencia de la destilación donde hay un requerimiento calórico para vaporizar la mezcla.

Sin embargo, considerando como punto crítico la eficiencia del proceso para el tratamiento de una solución alcohol – agua (mezcla azeotrópica) se determina que la destilación es la operación más acertada para tratar este sistema binario.

Los fenómenos que participan en la destilación deben entenderse como un conocimiento primordial en la carrera de un estudiante de ingeniería química, además del desarrollo de la habilidad práctica durante su formación.

Durante el aprendizaje de la teoría y aplicaciones de la operación de destilación se analizan los diferentes tipos de columnas de destilación, como son las de platos y de relleno, sin embargo, en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la ESPOL sólo se cuenta con una columna de platos, por lo que los estudiantes no pueden establecer un marco de comparación entre los diferentes tipos de diseño de columnas y no facilitaría la percepción de los estudiantes sobre las diferencias en la aplicación de destiladores con ambos diseños.

Por otro lado, el manejo de las técnicas analíticas para valorar la composición de las disoluciones que ingresan a la columna de destilación, la alimentación de la columna, la diferenciación entre trabajo continuo y discontinuo, entre otras, son condiciones que se deben de conocer al momento de tomar una decisión en el diseño y operación de una unidad de destilación.

A partir de ello, el desarrollo de las habilidades técnicas resultan ser de suma importancia para cuantificar los parámetros propios de la operación de separación, valorar su aplicación y adquirir destrezas en diseño y conducción del proceso mediante la apropiación de los conocimientos

específicos (Diagrama de McCabe-Thiele.- Obtención del número de platos teóricos.-Variación de la composición del destilado con razón de reflujo constante y modificado.- Balances de materia y energía.- Estudios dinámicos de fluidos, pérdida de carga y anegación de columna. Estudio del efecto de la temperatura de alimentación.- cálculo del número de platos teóricos, altura equivalente de un piso teórico en columnas de relleno, etc.) [1].

La comprensión de los conceptos de Ingeniería Química indicados en el párrafo anterior son un reto debido a su naturaleza teórico-práctica [2], de manera que debe constituirse en un objetivo de la práctica académica como parte del proceso de enseñanza aprendizaje para facilitar al estudiante la asimilación de los conceptos teóricos de forma directa en los procesos en los que se pueden observar, manipular y calcular [3].

1.1 Justificación

Entre los años 2005 y 2010, el Ecuador realizó importaciones totales de las sustancias químicas que superan las 5 mil millones de toneladas cada año en este periodo. Durante el 2009, las importaciones de sustancias químicas le significaron al país un gasto superior a los 6 mil millones de dólares, lo cual representó más del 10% del PIB nominal de ese año, según cifras del Banco Central del Ecuador. (Ministerio de Ambiente, 2011)

**Tabla I. Volúmenes Importados por Año en el Ecuador de
Sustancias Químicas**

Compuesto	Volumen Importado 2014 (Toneladas)
Dietanolamina	303.11
2-Etilhexanol	1.36
6 Hexanolactama	10
Ciclohexanona	127.43
Acetato de 2 etoxietilo	222.54
Acetato de isopropilo	0.05
Acetato de n-butilo	860.6
Acetato de propilo	1,241.37
Acetato de sodio	38.19
Acetato de vinilo	6,869.90
Alcohol metílico	14,310.29

Fuente: Banco Central del Ecuador, Comercio Exterior, Importaciones. Fecha de consulta: 12 de Enero de 2015. URL: http://www.portal.bce.fin.ec/vto_bueno/seguridad/ComercioExteriorEst.jsp
[4]

Se observa que la importación de combustible corresponde a la mayor importación del país, no obstante también se aprecian rubros de otras sustancias que juegan un papel importante en la economía ecuatoriana. Con el cambio en la matriz energética y productiva

propuesta por el actual gobierno, la construcción de la Refinería del Pacífico, las remodelaciones en refinerías actuales, se espera que las operaciones unitarias jueguen un rol importante y como se sabe, la destilación se emplea como parte primordial en los procesos de refinación y purificación.

Por todo lo indicado, el aprendizaje teórico-práctico de los principios de la destilación resulta fundamental durante la formación de los futuros profesionales, para desarrollar confianza en sus propias habilidades prácticas. De esta manera, la construcción de una columna de destilación de lecho empacado o relleno es una necesidad para que los estudiantes de la carrera de ingeniería química puedan realizar comparaciones de la operación, eficiencia y estructura de una columna de platos o bandejas además de la facilidad para manipular fácilmente variables como presión, temperatura y caudales.

Con ayuda de este equipo piloto se podrán desarrollar prácticas para reforzar los conocimientos adquiridos en clases y podrá ser utilizado en el área de investigación para cálculos de coeficientes, empaques y áreas de transferencia, así como para la práctica en los laboratorios con un equipo que permita manipular variables como presiones, temperaturas, caudales y simular condiciones que ocurren en los procesos industriales. Además podrá ser empleado en investigaciones a futuro para la elaboración de sustancias orgánicas que hoy en día se

importan en el país, dando lugar a un modelo piloto que puede ser aplicado en una industria.

Es importante que el equipo sea diseñado de forma óptima para la comprensión de los fenómenos, y de esta forma permitan que los estudiantes aprendan el fundamento de la operación para su vida profesional.

Finalmente, con el fin de destacar otra de las aplicaciones que se le suele dar a la destilación, se hace mención de la purificación o concentración de soluciones, partiendo del extracto de frutos secos, hierbas, frutas y algunas flores ya que este producto se comercializa en grandes cantidades dentro y fuera del país.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Diseñar, construir y poner en marcha una columna de destilación de lecho empacado.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Definir las variables del diseño del equipo.
- Desarrollar los cálculos necesarios para el diseño de este equipo piloto.

- Determinar condiciones óptimas para la correcta operación del equipo.
- Determinar experimental y teóricamente la eficiencia de este equipo.
- Elaborar el manual de operación del equipo.

1.3 Metodología Utilizada

El proyecto de “Diseño, construcción y operación de una columna de lecho empacado” consta de 3 fases fundamentales las cuales se mostrarán en la Figura 1.1.

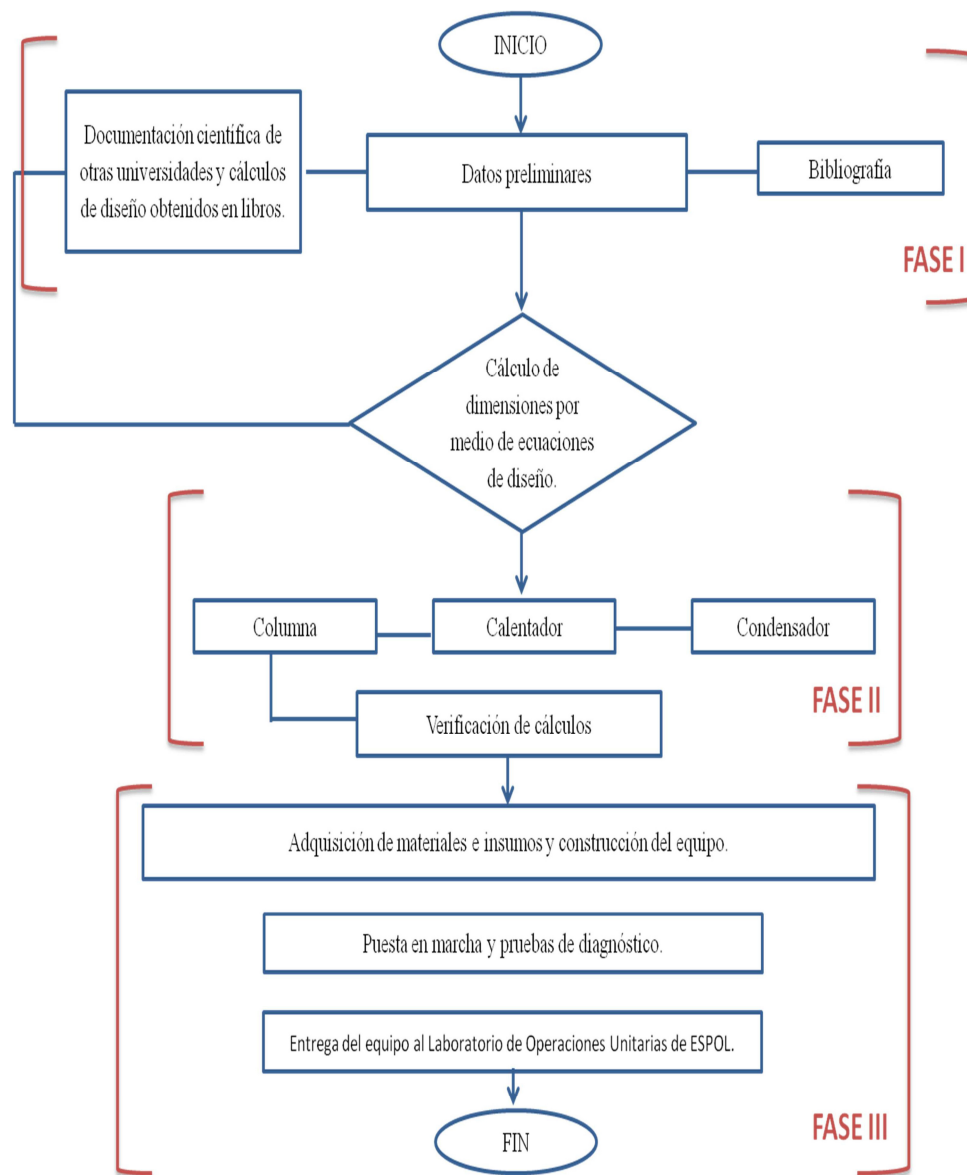


Figura 1.1 . Diagrama de la metodología utilizada

Fuente: Barcia A., Leon N.

- **FASE 1. ANÁLISIS HISTÓRICO DE PROYECTOS SIMILARES**

La primera fase del presente proyecto se basa en un estudio y análisis de proyectos similares que se han realizado previamente, este estudio comprende proyectos de tesis, investigaciones, bibliografías específicas al tema para definir condiciones y variables del proceso. El objetivo es tener una idea más clara sobre el proyecto y de prever cuáles serían los resultados a obtener o las complicaciones que podrían presentarse durante la ejecución del mismo.

- **FASE 2. PRUEBAS, CÁLCULOS Y VERIFICACIÓN**

Se procede con la realización de los cálculos pertinentes al diseño del condensador, la columna y el calentador basándose en las ecuaciones identificadas en la fase 1. En esta fase también se realizan pruebas de destilación del sistema binario alcohol - agua haciendo uso de equipo de laboratorio, con el propósito de identificar las variables de importancia y las condiciones a las que debe trabajar la columna.

Como muestra inicial a destilar se utilizó alcohol al 20% Vol., un destilador de vidrio y un condensador del mismo material y se obtuvo como producto alcohol al 80% Vol. trabajando a 78°C, 1 atmósfera y sin recirculación de producto.

- **FASE 3. ABASTECIMIENTO DE MATERIALES, CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

La tercera fase se puede considerar como la “fase pilar” del proyecto, ya que es la parte en donde se concentra la mayor exigencia de trabajo. Se procede a comprar los materiales, los cuales en la fase previa se identificó que deberían de ser de acero inoxidable para que no se oxiden con la solución de alcohol a usar (alcohol industrial); en un capítulo próximo se detallará las especificaciones de los materiales a usar. Además se toma en consideración el recurso humano a necesitar en el área eléctrica, electrónica, entre otras.

La construcción del equipo comienza tan pronto se tienen los materiales principales, como planchas de acero inoxidable de 2mm, mangueras plásticas, tuberías de acero inoxidable y demás, para finalmente realizar sucesivas pruebas a la unidad de destilación y obtener un registro de datos de la columna.

1.4 Métodos

Con el fin de lograr la ejecución exitosa de este proyecto y la consecución del logro, se utiliza un método de estudio que permita abordar de forma organizada y sistemática el tema, por este motivo el método a utilizar es referido como “Método Inductivo-Deductivo” el cual

consiste en la combinación de dos métodos establecidos cuyo fundamento se explica a continuación de forma individual.

1.4.1 Método Inductivo

Método que se utiliza en la recolección de información y en la determinación de las condiciones específicas requeridas en el sistema a partir de las propiedades físicas de la mezcla etanol – agua y su curva de equilibrio, este método tiene en cuenta la observación, la experiencia y la interpretación de hechos.

De forma general, se puede decir que el método inductivo funciona como base para el dimensionamiento del equipo.

1.4.2 Método Deductivo

El método deductivo es utilizado en el capítulo final de esta tesis, para realizar las conclusiones y recomendaciones que se fundamentan en los resultados logrados.

Este método permite descubrir consecuencias desconocidas a partir de principios conocidos emitiendo juicios [5].

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2. MARCO TEÓRICO

A continuación se definen los conceptos básicos, complementarios y específicos necesarios para la comprensión del desarrollo del presente proyecto, además se presenta un resumen de trabajos previos investigados que permitieron el desarrollo de este tema.

2.1 Etanol

“El compuesto químico etanol, conocido también como alcohol etílico, se presenta en condiciones normales de presión y temperatura como un líquido incoloro e inflamable con un punto de ebullición de 78.4 °C, como se muestra en la Tabla II. Al mezclarse con agua a la concentración de 95 % en peso forma una mezcla azeotrópica. Su fórmula química es $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$ y se considera el principal producto de las bebidas alcohólicas” [6].

Debido a que el etanol es el producto deseado en el uso de esta unidad de destilación, se procede a ampliar un poco más el conocimiento que se tiene del mismo.

Tabla II. Condiciones Normales del Etanol

Parámetros	
Apariencia	Incoloro
Densidad (kg/m ³)	789
Masa molar (g/mol)	46.07
Punto de fusión (K)	158.9
Punto de ebullición (K)	351.6
Temperatura crítica (K)	514
Presión crítica (atm)	63
Estructura cristalina	Sistema cristalino monoclínico
Viscosidad (mPa-s)	1.074

Fuente: Barcia A., León N.

2.1.1 Características y Aplicaciones

El etanol es un líquido incoloro y altamente inflamable siendo sus vapores más pesados que el aire. Este alcohol se puede obtener mediante modificación química o por medios naturales, el primer método no es muy utilizado en la industria y se basa en la hidratación del etileno en presencia de ácido fosfórico, el segundo método tiene su fundamento en la fermentación de frutas, caña de azúcar, entre otros; para su posterior destilación. A continuación, se presenta de forma breve las características físicas y químicas del etanol:

Tabla III. Propiedades Físicas y Químicas del Etanol

Propiedades Físicas	Propiedades Químicas
Estado de agregación: Líquido	Acidez (pKa) 15.9
Apariencia: Incoloro	Solubilidad en agua miscible
Densidad: $810 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	OH gas $-235.3 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
Masa molecular: 46.07 uma	OH líquido $-277.6 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
Punto de fusión: 158.9 K (-114.1 °C)	Termoquímica
Punto de ebullición: 351.6 K (78.6 °C)	
Temperatura crítica: 514 K (241 °C)	
Presión crítica: 63 atm.	

Valores en el SI y en condiciones normales (0°C y 1 atm),

salvo que se indique lo contrario

Fuente: Barcia A., León N.

2.1.2 Mezclas Azeotrópicas

Un azeótropo (o mezcla azeotrópica) es una mezcla líquida de dos o más compuestos químicos que hierven a temperatura constante y que se comportan como si estuviesen formados por un solo componente [7].

La mezcla de etanol y agua es una ejemplificación de este caso, estos dos componentes forman un azeótropo con una concentración en peso del 95%-5% de etanol y agua respectivamente, equivalente a 86% volumen (°GL), e l mismo que ebulle a una temperatura de 78.2°C. Para lograr llegar a esta concentración se debe utilizar la destilación simple, sin embargo, para algunas aplicaciones se necesita un compuesto más puro, tal es el caso de querer usarlo como aditivo en la gasolina y para obtenerlo es necesaria la rotura del azeótropo. Un ejemplo de este caso puede ser la adición de benceno a la mezcla que cambia la interacción molecular y elimina el azeótropo, pero una desventaja que posee este método es al tratar de separar o retirar el benceno que contiene la nueva mezcla de alcohol – agua. Un segundo ejemplo es la variación de presión en la destilación, debido a que el azeótropo depende de la presión este se salta a la destilación y puede ser continua [8].

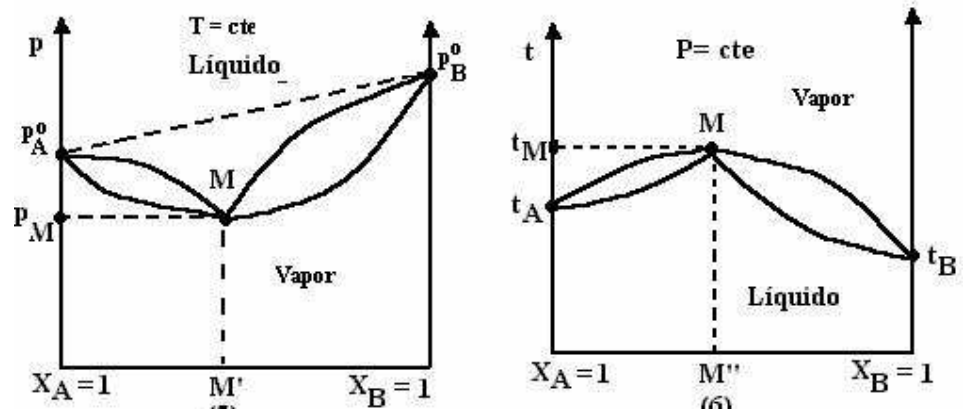


Figura 2.1. Diagramas de Mezclas Azeotrópicas
 Fuente: Universidad del Valle de México Coyoacán, Desviaciones de la Ley de
 Rault, Azeótropos. URL: <http://apuntescientificos.org/azeotropos-ibq2.html> [9]

La Figura 2.1 muestra un mínimo en la presión total del sistema y un máximo en la temperatura de ebullición en donde se demuestra que el punto M será precisamente el mínimo de PT o máximo en T_e , en la cual como se explicó anteriormente, es cuando la composición del líquido y el vapor son iguales. Sin embargo, es posible alcanzar concentraciones elevadas para una mezcla azeotrópica aplicando condiciones óptimas para su destilación.

2.2 Unidad de Destilación

La unidad de destilación consiste en un conjunto de equipos, cuyo objetivo principal es separar los componentes de una mezcla líquida obteniendo como producto el componente de mayor volatilidad en su estado más puro.

En este caso específico, se utilizará la unidad de destilación para separar una mezcla de etanol-agua que se encuentra inicialmente a una concentración del 20% Vol. y el producto o destilado a obtener es el etanol a una concentración del 94% Vol.

Las condiciones de operación de la unidad de destilación dependerán en gran medida de la mezcla a tratar, al ser una mezcla etanol – agua se considera como factor prioritario trabajar con acero inoxidable para las tuberías y piezas que soportarán altas temperatura; otro factor considerado de importancia es la presión dentro de la columna de destilación, la cual operará a presión atmosférica y no al vacío ya que la mezcla a tratar no es viscosa. Finalmente un factor influyente en la calidad del producto que se obtiene, es el aislamiento de la tubería por donde pasa el vapor, para evitar la condensación prematura del mismo.

A continuación se describirán los 3 equipos individuales que conforman la unidad de destilación simple del presente proyecto:

2.2.1 Columna de Destilación con Reflujo (Columna de Rectificación)

Una columna de destilación es un equipo cuya función principal es separar mezclas en sus componentes según su volatilidad, siendo el objetivo principal, en la mayoría de los casos, la recuperación del componente más volátil en su forma pura. *La separación de los componentes se da sometiendo el fluido a condiciones de presión y temperatura apropiadas, con el fin de lograr que las fracciones que se buscan separar se encuentren en dos estados diferentes* y exista un intercambio efectivo entre la fracción más pesada (líquida) y la más liviana (gaseosa), las cuales tienden a bajar y a subir respectivamente [10].

Para lograr alcanzar este objetivo la mezcla líquida que se encuentra en etapa de equilibrio debe someterse a calentamiento hasta que sus componentes más volátiles pasen a su fase de vapor y el flujo ascendente del vapor a través de la columna se mantenga constante. Al producto que no se volatiliza se le denomina “Fondo” y el vapor que se obtiene de la parte superior de la columna pasa a ser condensado en un intercambiador de calor. Con el fin de aumentar la eficiencia de la operación, la corriente que ha sido condensada pasa a ser dividida en dos fracciones, una fracción que se remueve llamada “Destilado” y

otra fracción que se recircula al punto medio de la columna denominada “Reflujo”, esta acción se realiza para mantener el contacto entre la fase de vapor ascendente y la corriente líquida que desciende por la columna [11].

Cabe mencionar, que la alimentación de la mezcla se realiza por un punto medio de la columna y la sección que se encuentra por debajo de este punto se denomina “Sección de Agotamiento” y la parte que se encuentra por encima del punto de alimentación se denomina “Sección de Enriquecimiento”. En la Figura 2.2 se procede a mostrar lo explicado.

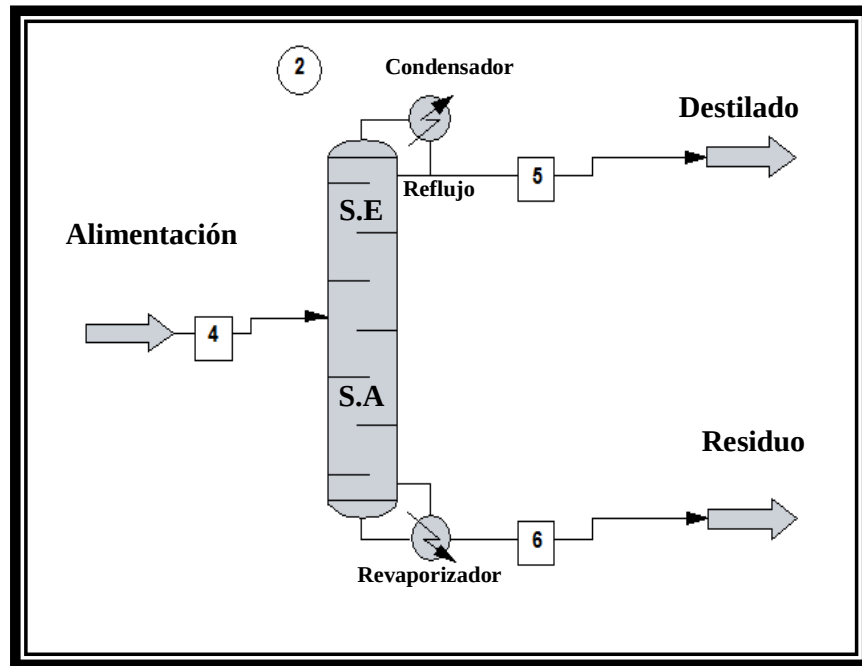


Figura 2.2. Diagrama de una Columna de Destilación con sus Partes

Fuente: Barcia A., León N.

Hasta este punto se ha hecho referencia al funcionamiento de una columna de destilación simple, sin embargo, existen las columnas de destilación compleja las cuales pueden poseer varias corrientes de alimentación o varias corrientes de productos.

Si se desea optimizar la transferencia de masa se debe aumentar la superficie de contacto entre ambas fases, lo cual se realiza mediante dos estructuras mecánicas: Las estructuras de empaque y las estructuras de platos o bandejas.

El diseño de una columna de destilación se basa principalmente en un balance global de masa en donde se podrá encontrar las fracciones en producción, residuo y alimentación. Usando estos resultados se trabaja con el Método de McCabe – Thiele para la obtención del número de platos y la ubicación de la alimentación, además se representa una curva de equilibrio que es obtenida a partir de la fracción de vapor y líquido en la destilación trabajando a 1 atmósfera de presión.

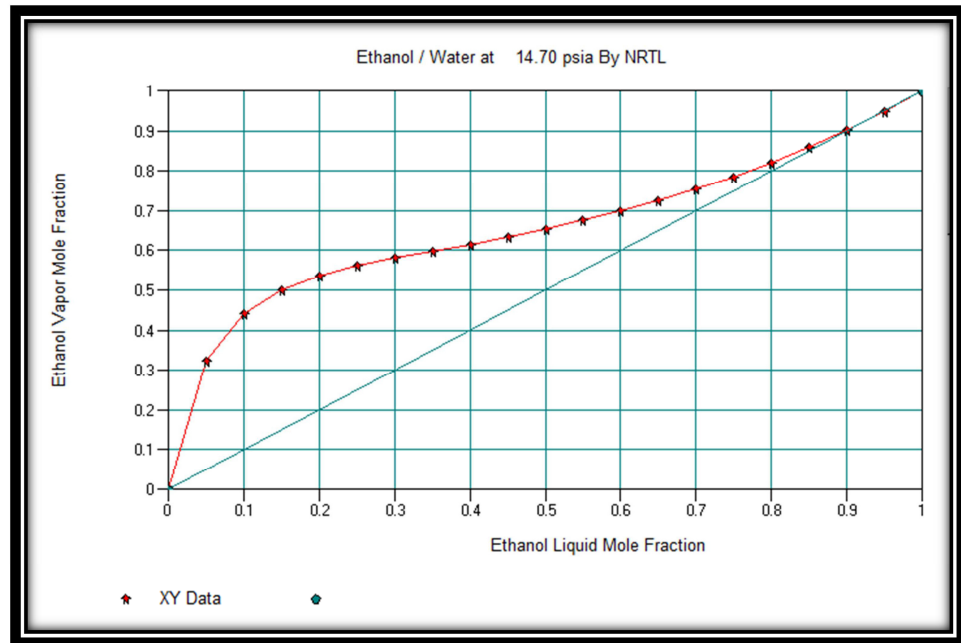


Figura 2.3. Gráfico de de Curva de Equilibrio L-V Sistema

Etanol – Agua a 1 atm de Presión

Fuente: Barcia A., León N.

La Figura 2.3 representa un diagrama de las fracciones de vapor y líquido en donde muestra la curva de equilibrio y la recta de operación, sin embargo es necesario acudir a las siguientes ecuaciones para obtener puntos importantes para graficar las curvas restantes. La ecuación para obtener flujos molares en una columna de destilación es la siguiente:

$$FX_F = DX_D + BX_B$$

Siendo F el flujo molar de alimentación, D el flujo molar del destilado y B el de residuo, por lo tanto sus fracciones son representadas por medio de X_F , X_D y X_B respectivamente.

La razón de reflujo R_D es un parámetro que se utiliza para reconocer el volumen de condensado que recirculará a la columna y el de producción, su ecuación se establece por medio de la siguiente relación.

$$R_D = \frac{L}{D}$$

En donde L es el flujo molar que retorna a la columna y D es el flujo molar del destilado como fue mencionado anteriormente.

Por consiguiente, se podrá obtener las líneas operativas de agotamiento y de enriquecimiento requeridas en el método de McCabe – Thiele, que obtienen un comportamiento lineal descritas de la siguiente forma:

$$y = \frac{R_D}{R_D + 1} x + \frac{X_D}{R_D + 1}$$

En donde, reemplazando los parametros ya calculados se obtendrá una línea que será graficada en la Figura 2.3.

La línea de alimentación se obtiene por medio de los siguientes criterios:

$$\text{Recta de alimentación: } Y = (q/(q-1)) X - X_f/(q-1)$$

q = calor necesario para vaporizar una mol en condiciones de F /calor latente de F.

- $q > 1$ Si la alimentación ingresa como líquido comprimido (líquido frío)

- $q = 1$ Si la alimentación ingresa como líquido al punto de burbuja.
- $0 < q < 1$ la alimentación ingresa como una mezcla vapor-líquido, q es la fracción como fase líquida.
- $q = 0$ Si la alimentación ingresa como vapor al punto de rocío.
- $q < 0$ Si la alimentación ingresa como vapor sobrecalentado.

En donde q es el factor que caracteriza el tipo de alimentación a la entrada de la columna.

Se conocen todas las curvas que se requieren en la Figura 2.3 para obtener el número de platos y a su vez la ubicación de su alimentación. Por consiguiente, en caso de requerir una columna de empaque, como se mencionará en los siguientes apartados, se emplearán las siguientes ecuaciones para conocer la altura de empaque con respecto al número de platos. Altura equivalente a un plato teórico:

$$HETP = \frac{(4.82 * (\rho_L - \rho_G)^{0.5} * \mu r^{-0.06})}{\alpha}$$

En donde:

HETP:	Altura equivalente a un plato teórico
ρ_L:	Densidad del líquido (kg/m ³) Cond. Normales
ρ_G:	Densidad del vapor (kg/m ³) Cond. Normales
μ_r:	Viscosidad del líquido sobre la viscosidad del agua a 20°C (kg/ms)
α:	Valor obtenido por medio de la siguiente ecuación

$$\alpha = a \left[(1 + 0.78e^{0.00058*a}) \left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{0.25} \right]^2$$

En donde:

a:	Área de la superficie geométrica de empaque (m ² /m ³)
-----------	---

Por medio de estas ecuaciones se relaciona el número de platos con la altura de lecho empacado como un segundo tipo de columna de destilación [12].

2.2.1.1 Columnas de Empaque o Relleno

En el presente proyecto se ha hecho uso de una columna de empaque, debido a que representan una menor inversión económica, tienen una menor caída de presión en su interior, no permiten la formación de espuma y son una mejor opción cuando se trabaja con diámetros pequeños [13].

Como se mencionó anteriormente, este tipo de columna maximiza el contacto entre las fases líquidas y de vapor, de la misma forma esto dependerá del tipo de empaque que se use y de la forma en que el mismo sea colocado (de forma ordenada o aleatoria).

Existen infinidad de empaques en la industria, los cuales comunmente son metálicos, de vidrio, de plástico o cerámicos pero todos convergen a las mismas características necesarias para cumplir con su función como empaque, entre ellas:

- Deben ser químicamente inertes con los fluidos de la columna.
- Deben ser resistentes mecánicamente.
- Deben proporcionar una baja caída de presión.

- Deben proporcionar un buen contacto entre el líquido y el gas.
- Deben ser de bajo costo.

Uno de los parámetros importantes al momento de escoger el empaque para la columna, es el diámetro de la misma, en este caso se han utilizado esferas de vidrio colocadas al azar, principalmente por su bajo costo y por su resistencia mecánica, ver Tabla IV. De igual forma el cuerpo geométrico que proporciona mayor superficie de contacto o mayor área de superficie específica es la esfera.

Tabla IV. Tamaño Recomendado de Empaque

Tamaño recomendado de empaque	
Diámetro de la columna	Tamaño
< 0.3 m	< 25 mm
0.3 – 0.9 m	25 - 39 mm
> 0.9 m	50 - 75 mm

Fuente: Robert E. Treybal. Segunda Edición. Operaciones de transferencia de masa [14]

2.2.1.2 Columnas de Platos o Bandejas

Este tipo de columnas consisten en una serie de platos o bandejas colocadas en el interior de la columna, en los cuales se lleva a cabo el contacto entre las fases líquida y gaseosa; es decir, la operación se lleva a cabo por etapas y no de forma continua [15].

En el diseño de las columnas de platos se debe tomar en cuenta el cálculo del número de platos teóricos que dependerá de la complejidad de la separación y que está determinado por las condiciones de equilibrio y el balance de materia.

La Figura 2.4 muestra un diagrama básico de una unidad de destilación que funciona con una columna de platos:

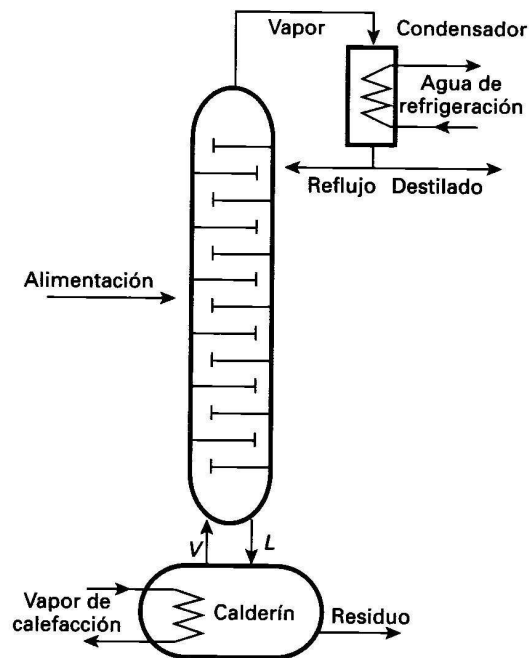


Figura 2.4. Diagrama de una Columna de Rectificación de Pisos

Fuente: Francisco Espínola (2005) Aplicación de método de McCabe-Thiele a la rectificación de mezclas binarias, Universidad de Jaén. Fecha de consulta: 7 de Enero de 2015. URL: <http://www4.ujaen.es/~fespino/Proyecto/unidad2/unidad2.htm> [16]

En el diagrama se puede apreciar las partes más importantes de una unidad de destilación, como la presencia de cinco corrientes de composiciones distintas y los platos con bajantes alternadas a un lado y al otro de la columna con el fin de obligar al líquido a recorrer un camino más largo y en forma de zig-zag hasta el último plato de la torre.

Para que se de el contacto entre fases, deben existir orificios en los platos que permitan el ascenso del vapor hasta la parte más alta de la columna, mientras el líquido desciende por gravedad por los platos en donde se da el equilibrio líquido – vapor.

Existen a su vez diversos tipos de platos a utilizar, entre ellos: platos perforados, platos de campanas burbujeadoras y platos de válvula. El tipo de plato a utilizar dependerá en gran medida de la aplicación que se le dará a la columna debido a que cada uno de ellos ofrece distintas ventajas y están sujetos a diferentes limitaciones. De manera general, las columnas de platos o bandejas ofrecen las siguientes ventajas:

- Se pueden obtener fracciones individuales cuando la mezcla es multicomponente.
- Son convenientes cuando se tienen velocidades de líquidas muy bajas.
- Fácil limpieza de los platos si es que se forman incrustaciones.
- Son más adecuadas si se desea manejar sistemas que forman espuma.

2.2.2 Calentador

Consiste en un equipo de acero inoxidable cuya función principal es calentar la mezcla de alimentación (etanol – agua) como paso previo a su entrada a la columna de destilación, por este motivo se encuentra conectado de forma directa hacia la misma.

El calentador consta de una resistencia de 6000 Watts (240 Voltios), de un sensor de temperatura y de un sensor de nivel con el fin de automatizar la operación de la unidad de destilación. La resistencia aporta la energía necesaria para aumentar la temperatura de la mezcla y con esto alcanzar su punto de ebullición y lograr la separación de los componentes del más volátil al menos volátil; la función del sensor de nivel es indicar con que volumen mínimo se puede encender la resistencia del calentador y con esto otorgar un factor de seguridad al usuario. Finalmente el sensor de temperatura determina y controla la temperatura a la que se requiere la mezcla la misma que es indicada por el usuario al encender el equipo.

2.2.3 Intercambiador de Calor

Una vez que se ha obtenido el etanol en su fase de vapor, es necesario convertirlo a su fase líquida; para ello se utiliza un intercambiador de calor, el cual es un dispositivo que permite calentar o enfriar un fluido mediante la transferencia de calor, debido a que su función en este caso es eliminar calor latente en lugar de sensible, se le hará referencia como “condensador”. Este equipo se ha diseñado tomando en consideración los caudales, temperaturas deseadas, entre otros parámetros que se detallarán más adelante.

Existen distintos tipos de intercambiadores de calor, sin embargo el que se ajusta a las necesidades del presente proyecto es el intercambiador de contacto indirecto, doble tubo y vertical.

El diseño del intercambiador de calor se basa en las ecuaciones que serán mostradas a continuación, cada una de ellas representan una parte del área y capacidad de líquido o vapor que soporte. De esta forma se consigue que la mayor parte del vapor se convierta en líquido por medio de su refrigerante, sin embargo es importante reconocer los parámetros conocidos para luego por medio de tablas encontrar área, flujos, temperaturas, etc.

$$Q = mC_p\Delta T$$

En donde:

Q:	Calor requerido en sistema (BTU/h)
m:	Flujo másico del agua (lb/h)
C_p:	Calor específico del agua (Btu/lb°F)
ΔT:	Diferencia de temperatura del agua (°F)

El principio de conservación de la energía es aplicable a todo tipo de sistema, en él se expresa que “la energía no se crea ni se destruye, se transforma”, por lo que la cantidad total de energía siempre permanece constante en todo el sistema [17]. El balance de calor para este tipo de sistema y con lo mencionado genera la siguiente ecuación, en donde se manifiesta que el calor sensible será aproximadamente igual al calor latente producido por el vapor.

$$Q_{vapor} \approx Q_{sensible}$$

En esta ecuación es posible obtener el calor requerido por el sistema, por el cual se puede encontrar los siguientes parámetros.

$$m_{etanol} = \frac{Q_{sistema}}{\lambda}$$

En donde:

- Q:** Calor requerido en sistema (BTU/h)
m: Flujo másico del etanol (lb/h)
 λ : Entalpia de vaporización (BTU/lb)

Valores de entalpía de vaporización se encuentra en el Anexo A1
 Por ser un flujo de vapor el que circulará por el condensador se trabaja con el calor latente del vapor.

Por otra parte se realiza el cálculo de media logarítmica por medio de las temperaturas obtenidas en el condensador, tanto de entrada como de salida de sus tuberías. Este cálculo de media logarítmica se aplica para reconocer si el vapor a tratar junto con el refrigerante deben de conectarse como flujo a contracorriente o paralelo, por lo que se observó que ambos generaban numéricamente un mismo valor, por lo tanto se concluye que al ser idénticos “todos los arreglos de temperatura se suponen en contracorriente”. (Kern, 1999, p.119) [18]. La media logarítmica es calculada de la siguiente forma:

$$MLDT = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}}$$

En donde, los diferenciales de temperatura son calculados por las entradas y salidas con respecto a los flujos frios y calientes.

Por otra parte se obtiene el valor del área de transferencia a partir de la ecuación global de transferencia de calor.

$$Q = U_D \Delta T A_T$$

En donde:

Q: Calor requerido en sistema (BTU/h)

U_D: Flujo másico del etanol (lb/h)

ΔT: Media logarítmica (°F)

A_T: Área de transferencia (ft²)

Como es necesario conocer la longitud de los tubos internos del condensador es importante relacionar el área de transferencia y su longitud por medio de la siguiente ecuación:

$$L = \frac{A_t}{\pi \frac{d_i}{12} n}$$

- L:** Longitud de tubos (ft)
n: Número de pasos
di: Diámetro tubería interna (pulg)
A_t: Área de transferencia (ft²)

Finalmente se calcula el número de tubos por medio del área de transferencia y la longitud de los tubos de tal forma que se obtiene la cantidad de tubos que se emplearán para la condensación

$$Nt = \frac{A_t}{L * S}$$

En donde:

- Nt:** Número de tubos
S: Superficie por pie lineal (ft²/ft)

2.2.3.1 Tipos

Existen diversos tipos de intercambiadores de calor, cuya clasificación está sujeta a distintos criterios, por ejemplo el tipo de contacto entre las corrientes fluidas, la relación del

área de transferencia de calor a volumen ocupado, el número de fluidos involucrados, el tipo de construcción y otros. La importancia de esta teoría radica al momento de seleccionar el intercambiador adecuado según su función y configuración para una aplicación determinada.

Para efectos del estudio se clasifican los intercambiadores de acuerdo al tipo de contacto entre las corrientes fluidas y al tipo de construcción. En el primer caso, los intercambiadores podrán ser de contacto directo o indirecto, se consideran de contacto directo cuando el calor es transferido directamente entre dos fluidos y de contacto indirecto si las corrientes permanecen separadas por una pared divisora.

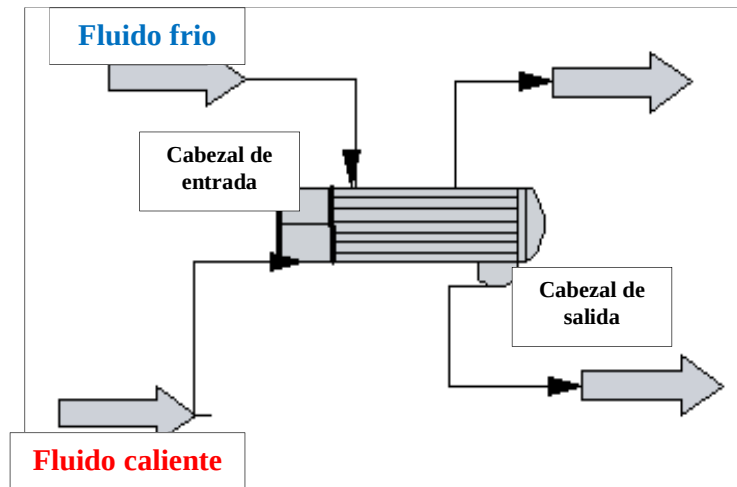


Figura 2.5. Diagrama de intercambiador de tubo y coraza

Fuente: Barcia A., León N.

En el segundo caso, clasificar los intercambiadores según el tipo de construcción tenemos: Los intercambiadores de doble tubo, de tubo y coraza, enfriados por aire y radiadores, de placas empacadas, entre otros. A pesar de que los de tubo y coraza suelen ser los más utilizados en las refinerías e industrias químicas debido a que son fáciles de limpiar, fáciles de reparar y proporcionan flujos de calor elevados en relación a su volumen y peso; existen también los intercambiadores de doble tubo que son los que se usan en este proyecto ya que son económicos, fáciles de construir y permiten trabajar con altas presiones, sin embargo como desventaja de este tipo de intercambiador se tiene que proporcionan una pequeña superficie de

transferencia de calor en comparación a los de tubo y coraza, ver Figura 2.5.

2.3. Trabajos Relacionados

Existen varios documentos en donde se establecen ciertos parámetros que son utilizados en este tema de tesis para cumplir con los objetivos en la fase de diseño, construcción y operación de una columna de destilación de lecho empacado. De la misma forma se utilizan métodos de simulación que permiten facilitar el proceso de toma de datos al iniciar la fase de construcción.

La tesis presentada en la *Escuela de Ingeniería Química de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo* preparó un tema que se asemeja al de este proyecto por lo tanto las propiedades de las sustancias empleadas sirvieron de ayuda para los cálculos realizados en el diseño de esta columna de destilación, sin embargo el autor de esta tesis de ESPOCH se basó en el software de simulación Aspen Hysys, el mismo que les facilitó la comprensión de la operación en un entorno más real como se lo logró con el software de Chemcad, descripción de este simulador en Capítulo 3 de esta tesis [19]. El simulador Hysys es una herramienta de informático que nos va a permitir diseñar o modelar procesos químicos mediante la ayuda de un software.

Este software posee herramientas que permiten estimar propiedades físicas, balances de materia y energía, equilibrios líquido-vapor y la simulación de muchos equipos de Ingeniería Química [20].

Por otro lado, en la Universidad Tecnológica Equinoccial en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería se desarrolló un prototipo de un destilador simple a nivel de planta, por lo que requirió de tablas para obtener gráficos como los de McCabe – Thiele, curvas de operación y la obtención de varios parámetros que se requieren para conocer diámetros, alturas, empaques, entre otros. Estas tablas fueron empleadas también en los cálculos del presente proyecto para obtener un standard al momento de aplicar el método de McCabe – Thiele [21].

CAPÍTULO 3

SIMULACIÓN

3. DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA UNIDAD DE DESTILACIÓN

Para el diseño de la unidad de destilación se decidió elaborar un diagrama P&ID donde se muestra el flujo del proceso en las tuberías, así como los materiales y equipos instalados con el fin de que el usuario pueda reconocer los líquidos a tratar, sus concentraciones y el estado en el que se encuentra circulando por el sistema.

Este diseño elaborado con el programa *Autocad Plant 3D – 2013* permite comprender la estructura y funcionamiento de la unidad de destilación además de que reconoce los detalles específicos que se podrían pasar por alto al momento de poner en marcha el equipo.

Como paso siguiente se realizó la simulación de la operación unitaria en el programa *Chemcad 6.1.3*, para verificar si los parámetros con los que se va a operar son los apropiados para el sistema, parámetros como: concentraciones de alimentación, temperatura y presión fueron manipulados en el programa para lograr obtener condiciones óptimas que permitieron alcanzar la concentración requerida, como se muestra en las Tabla V y Tabla VI. De la misma forma se obtuvo la altura a la cual debe de ingresar la alimentación por medio de una simulación en una columna de platos que fue indispensable al momento de la construcción del equipo.

Tabla V. Condiciones Óptimas de Alimentación para Simulación

PARÁMETROS	
Temperatura (°F)	78
Presión (psia)	14.6
Composición Componente A	0.144
Composición Componente B	0.576
Flujo Total ($\text{lbmol} \cdot \text{h}^{-1}$)	0.72

Fuente: Barcia A., León N.

Tabla VI. Condiciones Óptimas de Columna de Destilación para Simulación

PARÁMETROS	
Presión (psia)	14.6
Razón de Reflujo	3
Componente Liviano	0.92
Componente Pesado	0.02
Resistencia (MMBtu/h)	0.02047

Fuente: Barcia A., León N.

3.1 Diagrama Básico de una Instalación con la Unidad de Destilación con Reflujo.

El diagrama básico que se presenta a continuación se encuentra dividido en tres partes de acuerdo a las fases de la operación: La alimentación, el proceso de separación y finalmente la parte de condensación.

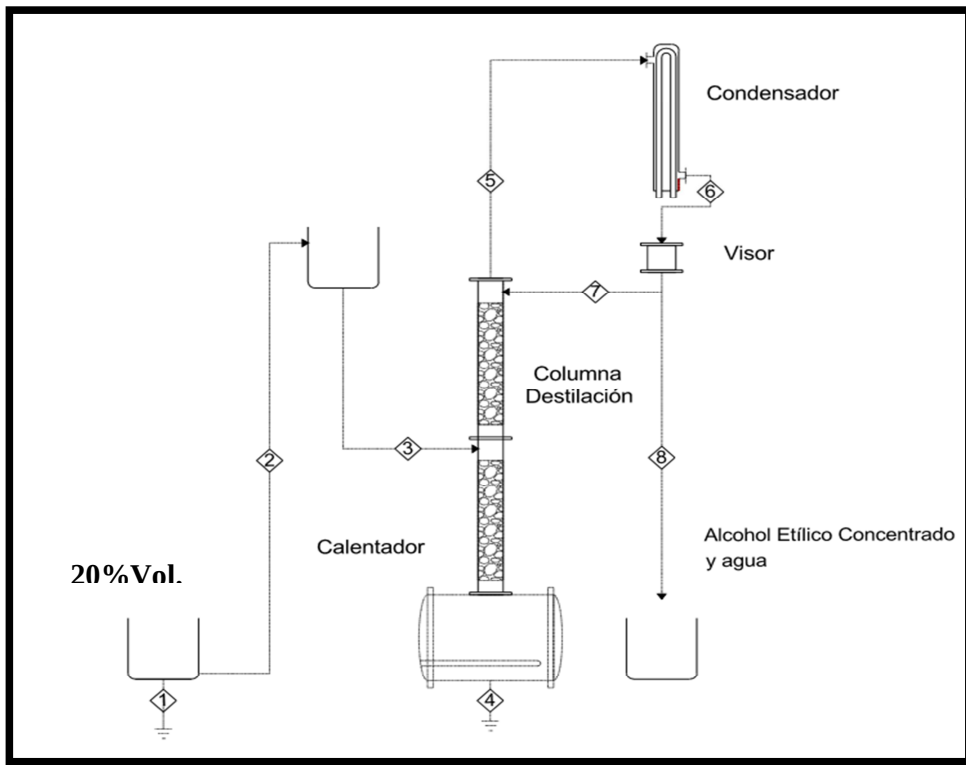


Figura 3.1. Diagrama Básico de un Sistema de Destilación

Fuente: Barcia A., Leon N.

Etapas 1. Alimentación

En esta primera etapa, el proceso fluye desde el recipiente que contiene la mezcla inicial en estado líquido a temperatura ambiente la cual se usará como alimentación al sistema. El recipiente se encuentra conectado a dos tuberías, una por su parte lateral y otra por su parte inferior, estas conexiones dan lugar a dos corrientes: la corriente 1 corresponde a una purga del líquido en caso de requerirlo y la corriente 2 se envía hacia otro recipiente por medio de bombeo.

Etapas 2. Proceso de Separación de la Mezcla (Rectificación)

En la segunda etapa ocurre lo que se conoce como separación de la mezcla, en donde la solución inicial se separa en sus componentes (alcohol y agua).

El segundo recipiente mostrado en la Figura 3.1 también está conectado a dos líneas, la corriente 2 previamente explicada en la Etapa 1 y corriente 3 por donde fluye la mezcla por gravedad para ingresar a la columna por debajo de la segunda brida.

Luego de que el líquido ingresa a la columna de destilación, empieza a caer por gravedad hacia el calentador atravesando el empaque de esferas de cristal que se encuentra dentro de la columna, de esta forma la mezcla alcanza el nivel requerido en el calentador para el encendido de la resistencia.

La corriente número 4 mostrada en la Figura 3.1 se utiliza en caso de requerir una muestra de la mezcla del calentador o para el drenado.

Al momento de alcanzar el nivel requerido, la resistencia calienta la mezcla y el vapor de alcohol comienza a subir a lo largo de la columna hasta llegar a la corriente número 5, la cual por diferencia de densidades entra al condensador. De esta misma forma una parte del vapor que sube a lo largo de la columna, colisiona con el líquido de alimentación de la corriente número 3, lo cual genera un contacto entre la fase vapor y líquido en donde se produce una transferencia de masa

y calor hasta alcanzar su equilibrio. Este mismo fenómeno ocurre dentro de la columna, cuando el líquido que cae por el lecho empacado (esferas de cristal) tiene contacto con el vapor que sube hacia la parte superior de la columna.

Las esferas de cristal permiten que exista mayor superficie de contacto entre las fases líquido y vapor, esto favorece a que el líquido frío que entra se caliente con el vapor que asciende y alcance su punto de ebullición más fácilmente, esto se conoce como equilibrio.

Etapas 3. Condensación

Finalmente ocurre la condensación del vapor que fluye por la corriente número 5, este vapor circula a través de un condensador vertical en donde el refrigerante utilizado es agua a temperatura ambiente.

Una vez alcanzada la temperatura de condensación del vapor a 78°C, el condensado cae por gravedad y da paso a la corriente número 6 como se muestra en la Figura 3.2.

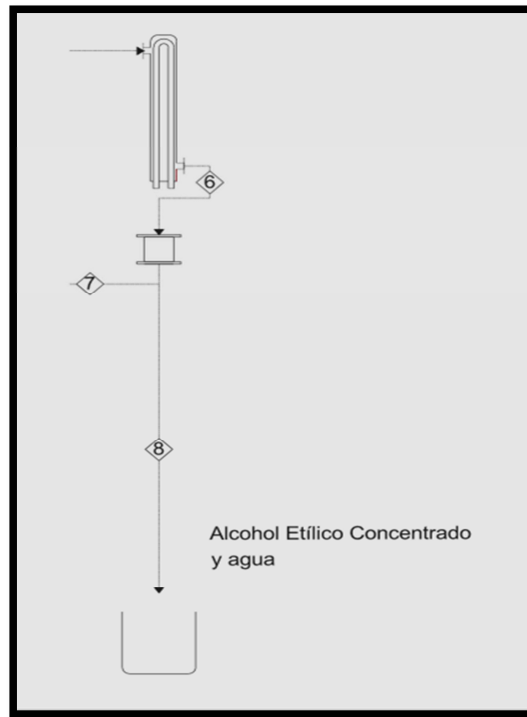


Figura 3.2. Etapa 3 del Sistema de Destilación (Proceso de Condensación)

Fuente: Barcia A., Leon N.

La corriente 6 se dirige hacia un visor de vidrio, el cual es usado como acumulador para el condensado y una vez que se alcanza el nivel óptimo se procede con la apertura de las válvulas que dan lugar a la formación de las corrientes número 7 y 8.

La corriente número 7 es la recirculación de condensado hacia la columna y tiene como objetivo el equilibrio de fases, al ingresar condensado por esta tubería y al existir una fase de vapor generada por la temperatura de la resistencia, existe un choque de fases que

permite alcanzar una destilación más eficiente. La recirculación o razón de reflujo, es un factor determinante en la calidad o concentración del condesado.

Por otro lado, la corriente número 8 llega hacia la parte final del sistema que es la producción del alcohol etílico concentrado.

3.1 Simulación del Sistema

3.1.1 Chemcad 6.1.3

Chemcad es una herramienta utilizada en su mayoría por ingenieros químicos o industriales ya que permite simular un proceso llevado a cabo en una industria.

Este software permite obtener tablas de resultados en donde se muestran valores calculados en base a parámetros físicos, termodinámicos y químicos, como densidad, entalpia, viscosidad y calor específico, lo cual brinda al usuario facilidades al momento de tomar una decisión sobre el proceso. Por ejemplo, en este caso se tiene una mezcla de alcohol y agua como alimentación y el producto a obtener de la destilación dependerá de la temperatura o presión a la que se opere el equipo, sin embargo, con Chemcad es posible decidir cuáles serán las condiciones óptimas de llevar a cabo el proceso.

El software Chemcad sirve como plataforma ingenieril en la simulación de procesos industriales, haciendo innecesaria la construcción de maquetas o el diseño de un experimento en el laboratorio, a pesar de su gran utilidad, existe la necesidad de conocer parámetros específicos para obtener valores mucho más exactos al momento de utilizar el programa.

3.1.2 Simulación

El diagrama básico diseñado en Autocad Plant 3D permite adquirir una idea más clara de la circulación de los fluidos a lo largo de cada una de las corrientes, pero parámetros tales como concentraciones, ubicación de corrientes y temperaturas fueron encontrados por medio de simulaciones realizadas en Chemcad 6.1.3.

Para realizar esta simulación únicamente se deben conocer las especificaciones de los equipos que se van a utilizar y las corrientes que van a existir, en este caso se conoce que se trabajará con una columna de lecho empacado, un condensador de tubos concéntricos, un calentador con resistencia de 6000W - 240V y además que existen 3 corrientes: alimentación, recirculación y producción.

Con estos parámetros conocidos se dibuja el equipo en la interfaz de Chemcad, tal como se muestra en la Figura 3.3.

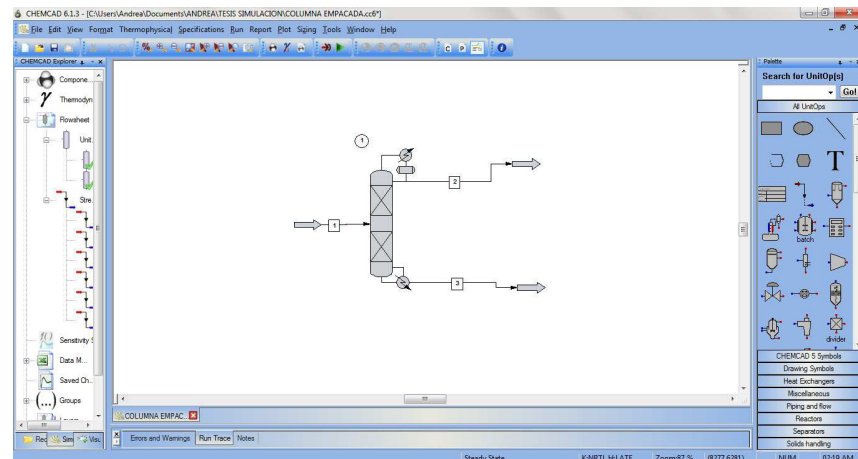
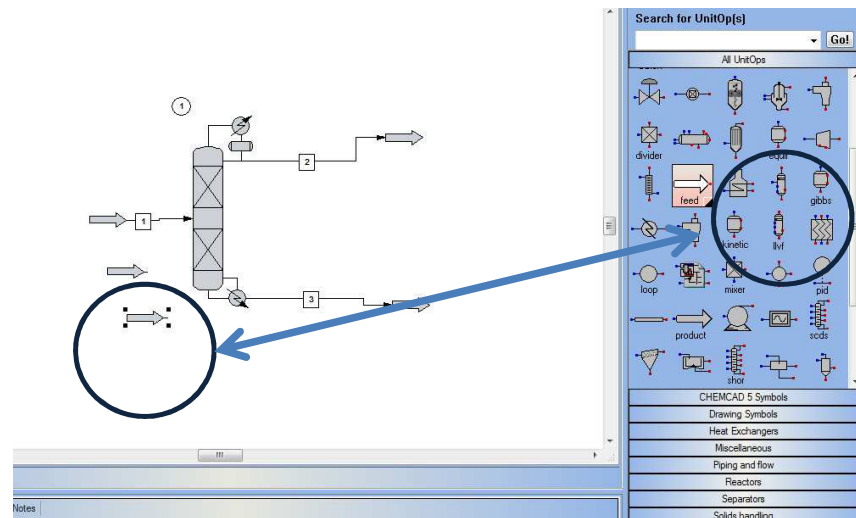


Figura 3.3. Interfaz de Simulador Chemcad con Columna de Destilación y Corrientes Correspondientes al Sistema de Destilación del Proyecto

Fuente: Chemcad 6.1.3

Como se puede observar se insertaron primero tres flechas que indican la alimentación, producción de tope y cola de la columna. Estas flechas de alimentación y de producción se las obtiene del lado derecho de la pantalla en la opción *All UnitOps*. Al seleccionar el icono se arrastra el cursor y se da click en el lugar en donde se desee ubicar como se muestra en la Figura 3.4.



**Figura 3.4. Interfaz de Simulador Chemcad Ubicando
Parámetros de Alimentación y Producción.**

Fuente: Chemcad 6.1.3

Una vez insertadas las flechas se procede a introducir el equipo principal para la operación, en este caso es la columna de destilación la cual separa los componentes de la solución de alcohol.

Chemcad da la opción de ingresar una columna de platos o de lecho empacado, pero lo recomendado, si no se conoce la ubicación de la alimentación, es realizar una primera simulación con una columna de platos para así lograr estimar la altura a la que se ubicará corriente de alimentación. Los tipos de columna se encuentran de igual manera de lado derecho de la interfaz.

Ya ingresado todos estos puntos a la interfaz, se colocaron las condiciones a las que se operará la columna y los componentes con los que se trabajará, en este caso etanol y agua, como se ve en la Figura 3.5.

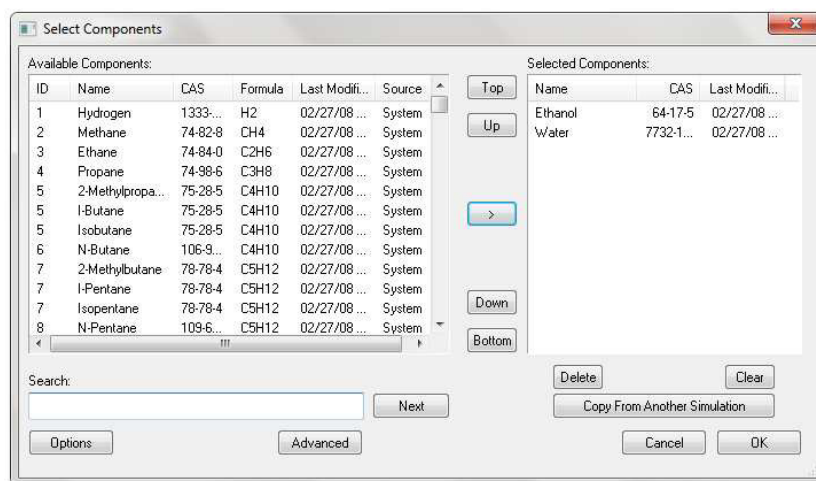


Figura 3.5. Agregando Componentes de la Mezcla para la Alimentación

Fuente: Chemcad 6.1.3

Para seleccionar los componentes con los que se trabajará, se seleccionó de la barra superior la opción *Thermophysical >> Select Components...* a continuación se mostró una ventana como la que se observa en la Figura 3.6. Aquí se seleccionaron los componentes a utilizar, en este caso alcohol etílico y agua.

Para insertar las fracciones a ingresar de cada componente se da un doble click a la corriente de alimentación como se muestra en la Figura 3.6.

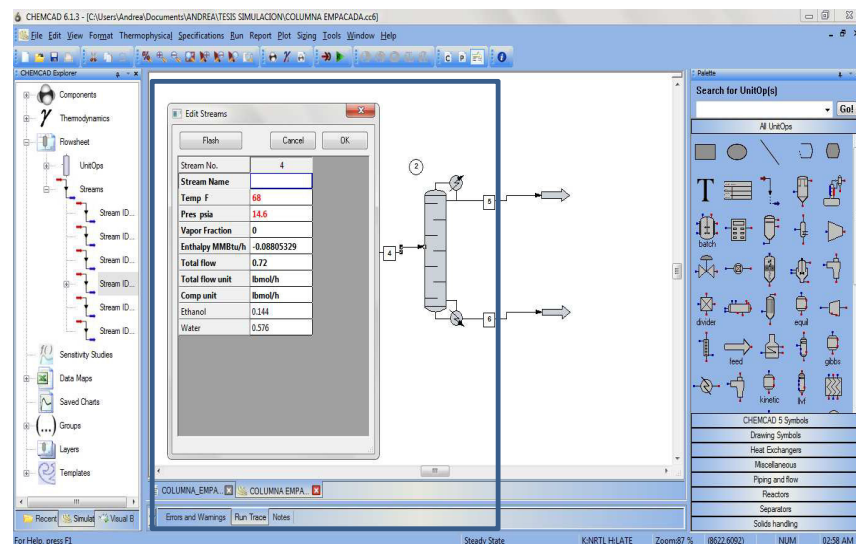


Figura 3.6. Interfaz de Simulador Chemcad Insertando Condiciones de la Corriente de Alimentación

Fuente: Chemcad 6.1.3

En la Figura 3.7 se muestran varios parámetros que pueden ser manipulados, entre ellos: temperatura, presión y fracciones de cada componente.

De la misma forma como es sencillo variar parámetros del flujo de alimentación, se pudieron cambiar condiciones de la columna para conocer los valores óptimos para su operación.

Dando doble click en columna se generó una ventana como la mostrada en la Figura 3.7.

Shortcut Column (SHOR) -

Select mode: 2 Design; FUG with Fenske feed tray location ID: 2

Select condenser type: 0 Total

Column pressure: 14.6 psia

Column pressure drop: psi

Number of stages: 10.1459

Reflux ratio:

R/Rmin: 1.75

Case Study

Number of points:

Lower bound R/Rmin:

Upper bound R/Rmin:

Key Component Specifications

Light key component: 1 Ethanol Heavy key component: 2 Water

Light key split: 0.92 Heavy key split: 0.02

Calculated Results

Condenser duty: -0.00928257 MMBtu/h

Reboiler duty: 0.0111316 MMBtu/h

Minimum stages: 6.40985 Reflux ratio, minimum: 1.63039

Feed stage: 6.5282 Reflux ratio, calculated: 2.85319

Help Cancel OK

Figura 3.7. Ventana de Parámetros de la Columna de Destilación Seleccionada

Fuente: Chemcad 6.1.3

Como se puede observar se tienen varias condiciones que se pueden cambiar para obtener las condiciones requeridas de producción. En caso de no conocer alguna condición es mejor dejarla en blanco al menos de que el programa exija que se la inserte.

En este caso, fue posible insertar la presión de la columna (1 atm), la relación de recirculación que será de $\frac{3}{4}$ y las composiciones estimadas de los componentes. Es importante también insertar el parámetro “Potencia de la resistencia” para obtener valores más exactos.

Al dar click en OK se puede correr el programa, con la flecha verde ubicada en la barra superior. Para conocer si el programa está trabajando de forma correcta, se debe revisar la barra inferior en la interfaz de Chemcad.

Una vez terminada la simulación se procedió a dar doble click en la columna para conocer el plato en el que se encuentra la alimentación. De esta forma se pudo estimar a que altura debe estar ubicada la alimentación, finalmente se procedió a realizar el mismo procedimiento para una columna de lecho empacado.

CAPÍTULO 4

CÁLCULOS Y RESULTADOS

4. CÁLCULOS Y RESULTADOS

El diseño y construcción de un equipo para cualquier operación unitaria debe estar basado en la aplicación de los cálculos y conceptos teóricos, cuyo conocimiento ha sido adquirido a lo largo de la formación del estudiante. Como apoyo a lo anteriormente indicado, se detallan las ecuaciones de diseño utilizadas y los resultados de los cálculos tabulados como sustento del presente proyecto y como guía para futuros emprendimientos en la construcción de una Unidad de Destilación de mayor dimensión.

Como primer paso, se muestra en un diagrama básico las variables más importantes a que se requieren a considerar en la Unidad de Destilación, ya que las mismas estarán presentes en la mayoría de ecuaciones.

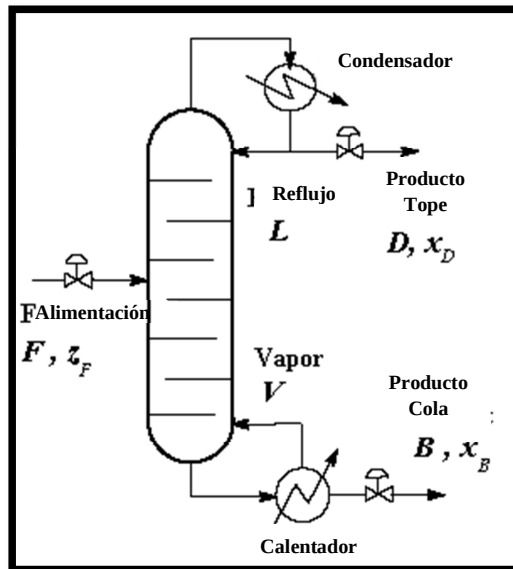


Figura 4.1. Esquema Detallando Entradas y Salidas en una Columna de Destilación

Fuente: Barcia A., León N.

Sin embargo, no solo se utilizaron las variables mostradas en la Figura 4.1, sino que además se efectuaron una serie de cálculos para el condensador y para la ubicación de otros equipos que forman parte del sistema de destilación. Es de observar que para la construcción se aplicaron los resultados óptimos obtenidos de las ecuaciones que permitieron el diseño de los equipos, en lugar de aquellos que no dieron valores positivos.

4.1 Ecuaciones de Diseño y Cálculos para la Columna de Destilación

4.1.1 Balance Global

Usando el diagrama que se muestra en la Figura 4.1 empleamos las variables indicadas para el balance global del sistema.

$$F = D + B \quad \text{Ec. 4. 1. 1 – 1}$$

$$FX_F = DX_D + BX_B \quad \text{Ec. 4. 1. 1 – 2}$$

Las ecuaciones anteriores son utilizadas para la obtención de caudales de destilado y residuo, por lo tanto se parte de conocer que el caudal de alimentación es de $3.75 \text{ galones} \cdot \text{hora}^{-1}$. A continuación se muestra el caudal de alimentación en $\text{kmoles} \cdot \text{hora}^{-1}$ conociendo las concentraciones a las que se ingresa la mezcla.

Mediante la conversión del caudal de alimentación a $\text{kg} \cdot \text{hora}^{-1}$ por medio de la densidad del alcohol etílico al 20%.

$$\rho = 58.75 \text{ lb} \cdot \text{ft}^{-3}$$

Se genera un caudal de entrada de:

$$\frac{58.75 \text{ lb}}{\text{ft}^3} * \frac{1 \text{ ft}^3}{28.32 \text{ L}} * 15 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1} * \frac{1 \text{ kg}}{2.2 \text{ lb}} = 14.15 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

Por utilización de los flujos molares, se obtienen los siguientes datos:

$$F = \frac{14.15kg}{h} * \left[\frac{0.2}{46} + \frac{0.8}{18} \right] = 0.69 kmol \cdot h^{-1} \quad Ec. 4.1.1 - 3$$

$$X_F = \frac{\frac{20}{46}}{\frac{20}{46} + \frac{80}{18}} = 0.089 \quad \text{Alimentación de alcohol}$$

$$X_D = \frac{\frac{94}{46}}{\frac{94}{46} + \frac{6}{18}} = 0.862 \quad \text{Destilado de alcohol}$$

$$X_B = \frac{\frac{2}{46}}{\frac{2}{46} + \frac{98}{18}} = 0.0079 \quad \text{Residuo de alcohol}$$

4.1.2 Caudales de Destilado y de Residuo

Por medio del balance global mostrado en el apartado 4.1.1 se procedió a calcular los caudales de destilado y residuo para así poder encontrar otros parámetros que permitan hacer un balance completo del sistema y generar una curva para encontrar alturas, puntos de alimentación, etc.

Reemplazando resultados en Ec. 4.1.1 – 2:

$$FX_F = DX_D + BX_B$$

$$(0.69)(0.089) = D(0.862) + B(0.0079) \quad Ec. 4.1.2 - 1$$

$$D + B = 0.69 kmol \cdot h^{-1} \quad Ec. 4.1.2 - 2$$

Y las variables de las ecuaciones Ec. 4.1.2 – 1 y Ec. 4.1.2 – 2, se obtiene el valor del caudal de residuo B:

$$B = 0.624 \text{ kmol} \cdot \text{h}^{-1}$$

De la misma forma despejando de la Ec. 4.1.2 – 2 el valor de D, se obtiene:

$$D = 0.066 \text{ kmol} \cdot \text{h}^{-1}$$

Una vez obtenido los caudales se procedió a calcular la razón de reflujo (R_D) por medio de la relación entre el caudal de recirculado y el total de destilado, así mismo conociendo que la recirculación es 3/4 del total de condensado y la producción es un 1/4 del total.

Por lo tanto se obtiene lo siguiente:

$$D \rightarrow 0.066 \text{ kmol} \cdot \text{h}^{-1} \rightarrow (1/4 \text{ total})$$

$$L \rightarrow x \rightarrow (3/4 \text{ total})$$

$$x = \frac{0.75 * 0.066}{0.25}$$

$$x = 0.198 \text{ kmol} \cdot \text{h}^{-1} = L$$

$$R_D = \frac{L}{D} \quad \text{Ec. 4.1.1 – 6}$$

$$R_D = \frac{0.198 \text{ kmol} \cdot \text{h}^{-1}}{0.066 \text{ kmol} \cdot \text{h}^{-1}}$$

$$R_D = 3$$

Realizando una comparación por medio del método gráfico de McCabe – Thiele es posible obtener la Razón de Reflujo mínimo mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{X_D}{R_{MIN} + 1} \quad Ec. 4. 1. 1 - 7$$

Por lo que este factor es numéricamente una distancia en el eje Y del gráfico de McCabe – Thiele. Ver Figura 4.2

$$\frac{X_D}{R_{MIN} + 1} = 0.35$$

$$R_{MIN} = \frac{0.862}{0.35} - 1$$

$$R_{MIN} = 1.8 * 1.5$$

$$R_{MIN} = 2.1 \approx 3$$

4.1.3 Línea Operativa Sector de Enriquecimiento, de Agotamiento y de Alimentación

Línea operativa del sector de enriquecimiento LOSE, es la curva que se introduce en el diagrama del cálculo por el *método gráfico de Mc Cabe*.

$$y = \frac{R_D}{R_D + 1} x + \frac{X_D}{R_D + 1} \quad Ec. 4. 1. 3 - 1$$

$$y = \frac{3}{3 + 1} x + \frac{0.862}{3 + 1}$$

$$y = 0.75x + 0.2155$$

La línea de alimentación se obtiene por medio de los siguientes criterios:

- Si $f=0$, el alimento será líquido a su temperatura de ebullición.
- Si $f=1$, el alimento será vapor a su temperatura de condensación.
- Si $0 < f < 1$, el alimento será una mezcla líquido vapor.

Por lo tanto, se deduce que el alimento será líquido a su entrada a la columna por lo que se estableció que la línea de alimentación tiene una pendiente igual a 0.

Para hallar la cantidad de platos que se pueden introducir en la columna se requiere de un gráfico de McCabe en donde se grafica las curvas generadas en apartados anteriores, que se muestra en la Figura 4.2. De esta forma se procedió a buscar la altura de la columna de destilación en base a la cantidad de platos generados en el gráfico de McCabe.

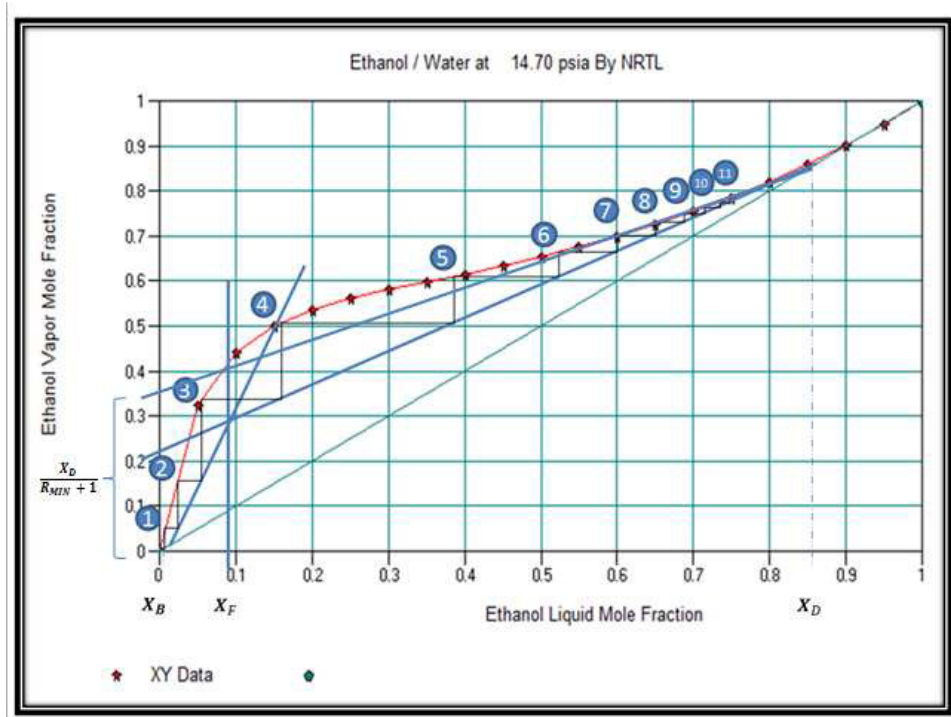


Figura 4.2 Gráfico de McCabe – Thiele para una solución de alcohol

Fuente: Barcia A., León N.

$$HETP = \frac{(4.82 * (\rho_L - \rho_G)^{0.5} * \mu r^{-0.06})}{\alpha} \quad \text{Ec. 4.1.3 - 2}$$

$$\alpha = a \left[\left(1 + 0.78 e^{0.00058 * a} \right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{0.25} \right]^2 \quad \text{Ec. 4.1.3 - 3}$$

Área de Superficie Geométrica

$$a = \frac{4\pi r^2}{\frac{4\pi r^3}{3}}$$

$$a = \frac{4 * \pi * (0.0119m)^2}{\frac{4 * \pi * (0.0119m)^3}{3}}$$

$$a = 252m^{-1}$$

Constante

$$\alpha = 252m \left[\left(1 + 0.78 * e^{0.00058 * 252m} \right) * \left(\frac{0.86kg \cdot m^{-3}}{1000kg \cdot m^{-3}} \right)^{0.25} \right]^2$$

$$\alpha = 12.68$$

Altura Equivalente a un Plato Teórico

HETP

$$= \frac{(4.82 * (786kg \cdot m^{-3} - 0.86kg \cdot m^{-3})^{0.5} * \left(\frac{4.50 \times 10^{-4}}{1.1 \times 10^{-3}} \right)^{-0.06}}{12.68}$$

$$HETP = 0.045m$$

Altura de Empaque

Se conoce el número de platos teóricos obtenidos de la simulación

$$Altura de Empaque = HETP * \#Platos Teóricos$$

$$Altura de Empaque = 0.045m * 11$$

$$Altura de Empaque = 0.495m$$

4.2 Ecuaciones de Diseño y Cálculos para el Condensador

En esta etapa del proceso de diseño se procedió a detallar las ecuaciones utilizadas para la deducción de cada una de las medidas del condensador, sin embargo cabe recalcar que en capítulos anteriores se mencionó el uso de un condensador vertical por lo que el enfoque de las ecuaciones de ahora serán estrictamente refiriéndose al diseño de un condensador vertical.

4.2.1 Datos de Fluido Frío y Caliente

Tabla VII. Datos del Proceso

Parámetro	Unidad	Fluido caliente		Fluido frío	
Fluido		Vapor de etanol		Agua	
		Entrada	Salida	Entrada	Salida
Flujo másico	$\text{lb}\cdot\text{h}^{-1}$	(-)		950	
Temperatura	$^{\circ}\text{F}$	173.5	173.5	82.4	89.6
Fracción másica de vapor		1	0	0	0

Fuente: Barcia A., León N.

Tabla VIII. Datos del Fluido Caliente

Propiedades a 173.5 $^{\circ}\text{F}$	Unidad	Valor
Entalpía Específica	$\text{BTU}\cdot\text{lb}^{-1}$	368.5
Calor Específico del vapor cpv	$\text{BTU}\cdot\text{lb}^{-1}\cdot^{\circ}\text{F}^{-1}$	0.78
Conductividad Térmica del vapor Kv	$\text{BTU}\cdot\text{lb}^{-1}\cdot^{\circ}\text{F}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$	0.114
Viscosidad del Vapor Uv	$\text{lb}\cdot\text{ft}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$	1.089
Densidad del vapor Pv	$\text{lb}\cdot\text{ft}^{-3}$	0.054

Fuente: Barcia A., León N.

Tabla IX. Datos del Fluido Frío

Propiedades a 86°F	Unidad	Valor
Entalpía Específica	BTU·lb ⁻¹	(-)
Calor Específico del vapor cpv	BTU·lb ⁻¹ ·°F ⁻¹	0.46
Conductividad Térmica del vapor Kv	BTU·lb ⁻¹ ·F ⁻¹ ·h ⁻¹	0.356
Viscosidad del Líquido Uv	lb·ft ⁻¹ ·h ⁻¹	2.057
Densidad del Líquido Pv	lb·ft ⁻³	62.37

Fuente: Barcia A., León N.

En las Tablas VII, VIII y IX se muestran las propiedades de los fluidos obtenidos del Anexo A2, A3, A4 y A5 tomando en cuenta la temperatura media correspondiente para cada sustancia.

4.2.2 Balance de Calor

El principio de conservación de la energía es aplicable a todo tipo de sistema, en él se expresa que “la energía no se crea ni se destruye, se transforma”, por lo que la cantidad total de energía siempre permanece constante en todo el sistema. El balance de calor para este tipo de sistema y con lo mencionado genera la ecuación 4.2.2 – 1, en donde se manifiesta que el calor sensible será aproximadamente igual al calor latente producido por el vapor.

$$Q_{vapor} \approx Q_{sensible} \qquad \text{Ec. 4.2.2 – 1}$$

Por lo tanto, es de esperarse que para un balance de calor se obtengan los parámetros requeridos para conocer su resultado,

se observó que en las Tablas VII, VIII y IX existían más propiedades para calcular el calor del sistema por el líquido refrigerante que por el vapor de alcohol, por lo que mediante la ecuación 4.2.2 – 2 se obtiene el calor requerido por el sistema generado por el agua:

$$Q = mC_p\Delta T \quad \text{Ec. 4.2.2 – 2}$$

En donde:

Q: Calor requerido en sistema ($\text{BTU} \cdot \text{h}^{-1}$)

m: Flujo másico del agua ($\text{lb} \cdot \text{h}^{-1}$)

C_p: Calor específico del agua
($\text{Btu} \cdot \text{lb}^{-1} \cdot \text{F}^{-1}$)

ΔT: Diferencia de temperatura del agua
(°F)

$$Q = 1029.6 \text{ lb} \cdot \text{h}^{-1} * 0.46 \text{ BTU} \cdot \text{lb}^{-1} \cdot \text{F}^{-1} * (89.6 - 82.4)$$

$$Q = 3410.04 \text{ BTU} \cdot \text{h}^{-1}$$

4.2.3 Flujo Másico Vapor de Alcohol

Una vez calculado el calor requerido del sistema se utiliza este resultado para obtener por medio del calor de vaporización, el flujo másico del etanol mediante la siguiente ecuación:

$$m_{etanol} = \frac{Q_{sistema}}{\lambda} \quad Ec. 4.2.2 - 3$$

En donde:

Q: Calor requerido del sistema
($BTU \cdot h^{-1}$)

m_{etanol}: Flujo másico del etanol ($lb \cdot h^{-1}$)

λ: Entalpia de vaporización ($BTU \cdot lb^{-1}$)

Se observó que las Ec. 4.2.2 -2 y Ec. 4.2.2-3 se diferencian por el tipo de líquido que circula en cada una de las tuberías, debido a que el fluido en un caso es vapor de alcohol, se considera un calor de vaporización, mientras que en el caso anterior es de considerarse un calor sensible.

Por lo tanto:

$$m_{etanol} = \frac{Q_{sistema}}{\lambda}$$

$$m_{etanol} = \frac{3410.04 \text{ BTU} \cdot h^{-1}}{368.5 \text{ BTU} \cdot lb^{-1}}$$

$$m_{etanol} = 9.25 \text{ lb} \cdot h^{-1}$$

4.2.4 Media Logarítmica (MLDT)

La media logarítmica se calcula por medio de las temperaturas obtenidas en el condensador, tanto de entrada como de salida de sus tuberías. Este cálculo de media logarítmica se aplica para reconocer si el vapor a tratar junto con el refrigerante deben de conectarse como flujo paralelo o en contracorriente, por lo que se observó que ambos generaban numéricamente un mismo valor, por lo tanto se concluye que al ser idénticos.

$$MLDT = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} \quad \text{Ec. 4.2.4 - 1}$$

$$MLDT = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1} \right)} \quad \text{contracorriente}$$

$$MLDT = \frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{\ln \left(\frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_2} \right)} \quad \text{paralelo}$$

$$MLDT = \frac{(173.5 - 89.6) - (173.5 - 82.4)}{\ln \left(\frac{173.5 - 89.6}{173.5 - 82.4} \right)}$$

$$MLDT = 87^\circ F$$

4.2.5 Cálculo del Área de Transferencia

Se asumió un valor de coeficiente total para diseño obtenido de Tabla. 8 que se muestra en el Anexo A6, partiendo de que el flujo de vapor corresponde a un vapor de alcohol y el flujo de refrigerante es agua.

$$\text{Valor asumido} = 200 \text{ BTU} \cdot \text{h}^{-1} \text{ft}^{-2} \text{F}^{-1}$$

Se procedió a calcular el área de transferencia del condensador por medio de la siguiente ecuación:

$$Q = U_D \Delta T A_T \quad \text{Ec. 4.2.5 - 1}$$

Q: Calor requerido en sistema ($BTU \cdot h^{-1}$)

U_D: Coeficiente de transferencia global
($Btu \cdot ft^{-2} \cdot F^{-1} \cdot h^{-1}$)

ΔT: Media logarítmica (°F)

A_T: Área de transferencia (ft²)

$$A_T = \frac{Q}{U_D MLDT} \quad \text{Ec. 4.2.5 - 2}$$

$$A_T = \frac{3410.04 \text{ BTU} \cdot h^{-1}}{200 \text{ Btu} \cdot ft^{-2} \cdot F^{-1} \cdot h^{-1} * 87^\circ F}$$

$$A_T = 0.181 \text{ ft}^2$$

4.2.6 Cálculo de la Longitud del Tubo

La longitud del tubo se obtiene a partir de características del cilindro a utilizar, el área de transferencia obtenida en el apartado anterior y el número de pasos. Este resultado se podrá utilizar para conocer el tipo de arreglo que debe tener la tubería interna del condensador, mediante la siguiente ecuación es posible obtener este resultado.

$$L_T = \frac{A_t}{\pi \frac{d_i}{12} n} \quad \text{Ec. 4.2.6 - 1}$$

L_T: Longitud de tubos

n: Número de pasos

d_i: Diámetro tubería interna (pulg)

A_T: Área de transferencia (ft²)

$$L = \frac{0.181 ft^2}{\pi * \frac{0.5}{12} * 2}$$

$$L = 1 ft$$

Este resultado permite obtener número de tubos presentes en el condensador.

4.2.7 Cálculo del Número de Tubos

El número de tubos se calcula evaluando los parámetros del área de transferencia calculada en el apartado anterior, la longitud del tubo

$$Nt = \frac{A_t}{L * S} \quad \text{Ec. 4.2.7 - 1}$$

Nt: Número de tubos

L_T: Longitud de tubos (ft)

S: Superficie por pie lineal (ft²·ft⁻¹)

A_T: Área de transferencia (ft²)

$$Nt = \frac{0.181ft^2}{1ft * 0.1309ft}$$

$$Nt = 2$$

El valor de superficie por pie lineal se obtiene utilizando el valor del diámetro del tubo interno del condensador. Por medio de este valor se recurre al Anexo A7 y se lee el valor de S.

De esta forma se logra obtener datos para el diseño del condensador, no obstante se debe señalar que la posición del condensador será vertical por facilidad al ubicarse en el soporte metálico y mayor obtención de condensado.

4.3 Cálculos para Ubicación del Visor/Tanque Acumulador en el Sistema

El cálculo de la ubicación del visor es un dato muy importante si se quiere aprovechar la altura y dejar caer por gravedad el líquido condensado, del visor hacia la columna como recirculación y producción. Debido a la altura empleada para su construcción, se utilizará el valor de la presión ejercida por una columna de líquido generada en el visor para el retorno de condensado y línea de producción.

A continuación se muestra el cálculo empleado para conocer su altura, conociendo que la columna opera a presión atmosférica.

$$P_B - P_{atm} = 0$$

$$P_x - P_B = \rho gh$$

$$P_y - P_x = \rho gL$$

$$P_y - P_{atm} = \rho gh + \rho gL \quad \text{Ec. 4.3 - 1}$$

Tomando en cuenta la presión en diferentes puntos del sistema se obtiene la Ec. 4.3 -1, sin embargo si se observa la Figura 4.2 se obtiene una presión (P1) en el punto de entrada hacia la columna, esta presión debe de ser mayor a la atmosférica para evitar el retorno de vapor por la línea de recirculación, por lo tanto:

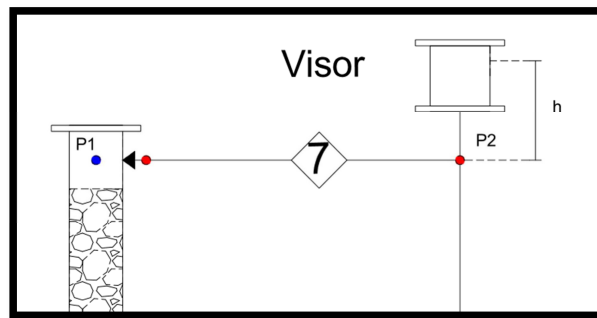


Figura 4.3. Esquema Detallando Presiones Involucradas en Columna y Visor

Fuente: Barcia A., León N.

$$P_2 = P_{atm} + \rho gh \quad \text{Ec. 4.3 – 2}$$

En donde:

P₂: Presión en un punto determinado del sistema (Pa)

P_{atm}: Presión atmosférica (Pa)

ρ: Densidad de la solución ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

g: Gravedad ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)

h: Altura (m)

Se optó por trabajar con una presión de entrada a la columna de 1.01 atm con la finalidad de asegurarse de que esta fuese mayor a la atmosférica, no obstante se debe de considerar el cálculo de la Ec. 4.3 – 2 para conocer la altura a la que se debe de ubicar el visor en el sistema.

$$P_2 = P_{atm} + \rho gh$$

$$P_2 - P_{atm} = \rho gh$$

$$(1.01 - 1) * 101325 \text{Pa} = \frac{785.06 \text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{9.8 \text{m}}{\text{s}^2} * h$$

$$h = 0.13 \text{m}$$

Por lo tanto, se concluye que el visor debe de ubicarse a 0.13m del punto de alimentación de la recirculación para permitir su caída por gravedad y evitar el paso de vapor hacia esta línea.

CAPÍTULO 5

CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE LA UNIDAD DE DESTILACIÓN

5. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE LA UNIDAD DE DESTILACIÓN

En el presente capítulo se detallan los materiales e insumos que han sido utilizados para construir la unidad de destilación, señalando también los costos en los que se ha incurrido tanto como de operación, de transporte y de mano de obra.

Se definen de forma macro los costos y la inversión total que se realizó para llevar a cabo la consecución del logro y además se detalla el precio unitario en el mercado ecuatoriano de todos los materiales utilizados, el fin es que esto sirva como base para futuros proyectos o cálculo de inversiones en proyectos similares.

5.1 Construcción de la Unidad de Destilación

La columna de destilación (Ver Figura 5.1) se construyó con dos tuberías de acero inoxidable de 3.5" de diámetro, el cual es un material altamente resistente a la suciedad y a la corrosión que se podría producir por la presencia del etanol. Debido a que las uniones deben estar perfectamente selladas, se utilizó soldadura de Argón con electrodos y se pulieron cada una de estas uniones con ayuda de discos de corte y lijas de agua, de la misma forma haciendo uso de masilla en pasta se logró equiparar partes de la soldadura que no se encontraban niveladas y se procedió a lijar nuevamente.

Es importante considerar que si se esmerila o pule con discos, éstos deben de estar libres de partículas de hierro o acero al carbono, por tal motivo se puede observar en el Anexo A8 que se tiene un disco de corte de acero inoxidable que fue con el que se pulió la tubería de acero empleada para la construcción de la columna de destilación.

Como se puede observar la columna en su parte inferior está conectada a un calentador, por medio de una brida (Ver Figura 5.2). El calentador posee en su estructura una tapa con arco y también tiene una brida soldada con electrodos de argón para su mejor sellado. Este calentador tiene una capacidad máxima de 20 litros, en la cual, para una mayor estabilidad se colocaron dos soportes en su parte inferior que logran estabilizar el cilindro dando lugar a un espacio para la purga y para un medidor de nivel. De la misma forma en su parte lateral izquierda posee una perforación soldada con electrodo de argón un niple de 1" de diametro roscable que servirá para sujetar la resistencia CAMCO de 6000 Watts de 6.8" de longitud.



**Figura 5.1. Columna de Destilación y Calentador Conectado por
Bridas**

Fuente: Barcia A., León N.



Figura 5.2. Calentador Empleado en Unidad de Destilación

Fuente: Barcia A., León N.

Finalmente, el tercer equipo que forma parte de la unidad de destilación es un condensador de acero inoxidable, el cual consta de una brida que facilita que el equipo sea desarmado para actividades de limpieza o alguna otra acción que se quiera realizar. Contiene dos neoplos de 0.5" de diámetro soldados con soldadura de argón en su parte lateral superior e inferior.

El condensador vertical de 3.5" de diámetro y 23.6" de altura, cortado y soldado con electrodos de argón, contiene tubos de cobre en su interior que fueron doblados para dar un arreglo cuadrado en su estructura interna. (Ver Figura 5.3)

Agua a temperatura ambiente es el refrigerante que circulará por dentro de las tuberías de cobre por lo que será el vapor de alcohol el que estará alrededor de estas tuberías para luego pasar a su fase de líquido alcanzando la temperatura requerida dentro del condensador.

Las perforaciones necesarias en los distintos equipos que conforman la unidad de destilación fueron realizadas con taladro y brocas de cobalto, con el fin de tener una mayor precisión al perforar ya que estas brocas están diseñadas para taladrar metales de todo tipo, además tienen una especial resistencia a la temperatura por lo que se pueden utilizar sin refrigerante y a altas velocidades de corte.



Figura 5.3. Condensador Ubicado en Unidad de Destilación

Fuente: Barcia A., León N.

5.2 Construcción de la Estructura de Soporte

Es importante elegir un material de calidad al momento de construir la estructura de soporte, debido a que en ella se apoyará toda la unidad de destilación. En este caso se optó por trabajar con hierro debido a que es un material fuerte, económico y se lo encuentra fácilmente en el mercado ecuatoriano, como desventaja se tiene que es un material que

puede corroerse pero se procedió a colocar una capa de pintura anticorrosiva PINTUCO sobre su superficie.

La estructura de hierro fue soldada utilizando electrodos 6011 con ayuda de una máquina de soldadura por arco eléctrico, por consiguiente los ángulos de hierro de 2 x 1/8" de dimensión fueron cortados y pulidos con discos de corte. Una vez cortados a sus largos correspondientes, se procede a soldar sus partes para dar lugar a una estructura rectangular en donde se monta el equipo de destilación (Ver Figura 5.4).



Figura 5.4. Estructura de Soporte para Unidad de Destilación

Fuente: Barcia A., León N.

5.3 Instalación del Sistema Eléctrico

El sistema eléctrico de la unidad de destilación consta de dos partes:

- La primera etapa es al accionar el selector, si esto ocurre se pone en contacto con el contactor permitiendo un paso eléctrico que encenderá la luz piloto. Al estar activo el breaker de 1Polo y 15A este dejará pasar electricidad para accionar la bomba que sube el fluido hasta el otro recipiente, tal como fue explicado en capítulos anteriores.
- La segunda etapa de este sistema es la conexión de la resistencia por un paso de corriente de dos líneas, esto estará conectado al sistema electrónico del proyecto con microprocesador Arduino, por tal motivo todo estará conectado a un mismo toma corriente de 120V como se muestra en la Figura 5.5. Debido al funcionamiento electrónico de la resistencia, en donde se controlará su encendido y apagado por medio de una termocupla ubicada en la parte superior de la columna de destilación, se planteará otro esquema en donde se detallarán las conexiones del microprocesador para el correcto uso por el usuario.

En la Figura 5.5 se pueden observar las dos etapas que se describen en los parámetros anteriores, el diagrama de fuerza y control permite obtener una visión general de la parte eléctrica tanto de la bomba como de la resistencia.

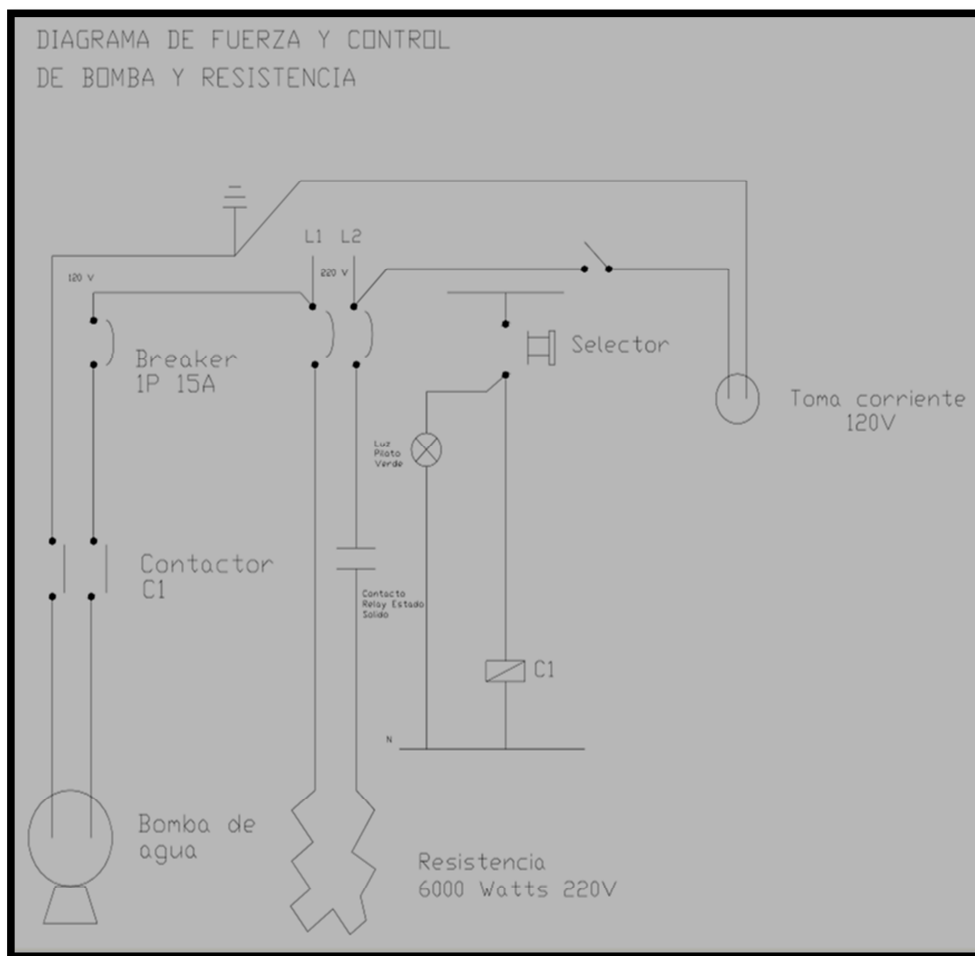


Figura 5.5. Diagrama de Fuerza y Control de Bomba y Resistencia

Fuente: Barcia A., León N.

5.4 Instalación del Sistema Electrónico

El sistema electrónico instalado en la Unidad de Destilación, consta de 6 componentes importantes: un relé de estado sólido, un microcontrolador Arduino Mega, un teclado alfanumérico, una pantalla LCD, un sensor de nivel y cuatro sensores de temperatura. Para una

mejor comprensión del circuito ver Figura 5.6 en donde muestra un diagrama esquemático que detalla la conexión entre los componentes antes mencionados.

El circuito tiene 3 entradas definidas de las cuales se hablará a continuación: un teclado alfanumérico que le permite al usuario establecer la temperatura deseada dentro del calentador; el sensor de nivel que se encarga de enviar niveles lógicos de voltaje al microcontrolador Arduino en función de la cantidad de líquido en el interior del calentador y por último los sensores de temperatura digitales y sumergibles ubicados en distintos puntos de interés en la Unidad de Destilación, los mismos que establecen una conexión mediante el protocolo de comunicación OneWire con el Arduino y de esta forma cada sensor envía en tiempo real la información correspondiente a la temperatura medida.

Las salidas del circuito corresponden a la pantalla LCD y el relé de estado sólido, en la pantalla se muestran las temperaturas que han detectado los sensores y además se indica si la resistencia se encuentra encendida o apagada. El relé de estado sólido cumple con la función de permitir o impedir el paso de la corriente según la señal que le envíe el microcontrolador Arduino, es decir, enciende o apaga la resistencia ubicada dentro del calentador.

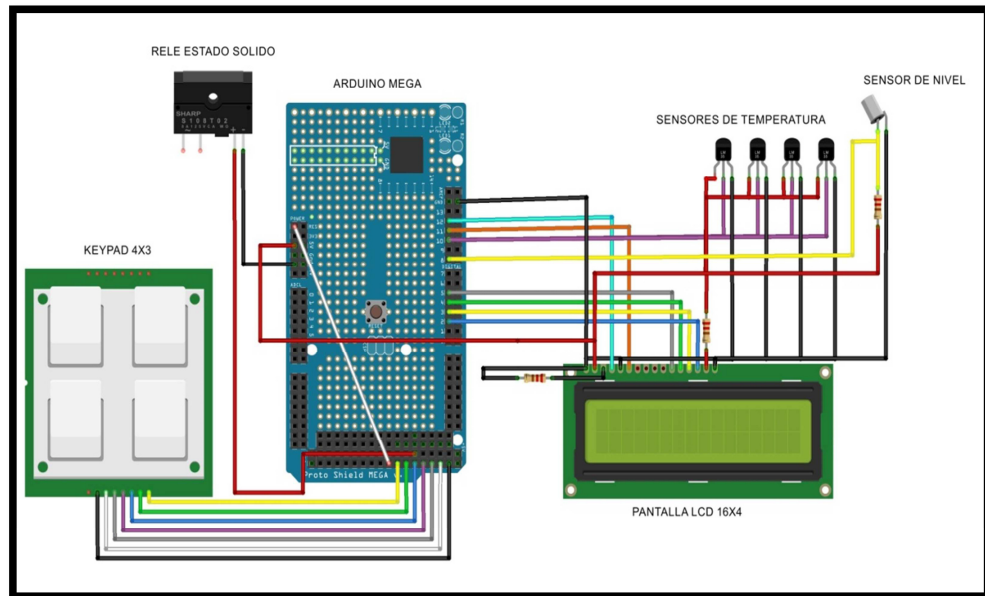


Figura 5.6. Diagrama Electrónico

Fuente: Barcía A., León N.

5.5 Tuberías y Accesorios

Las tuberías empleadas en la construcción de la unidad de destilación al igual que el material de los equipos, son de acero inoxidable para evitar la corrosión por el uso de alcohol en el proceso, no obstante se entiende que no todas las corrientes pasan por un mismo diámetro de tubería. Uniones, codos, tee, reductores y nudos también son de acero inoxidable y su dimensión estará determinada por la tubería en donde se coloquen.

Cada una de las uniones de accesorios en las tuberías contiene permatex y teflón para evitar cualquier tipo de fuga, ambos componentes son importantes ya que al trabajar con un líquido altamente volátil y a temperaturas mayores a 90°C pueden generarse fugas que al momento de operar la unidad serán difíciles de detectar y podrán afectar a la eficiencia del equipo.

La mayor parte de las corrientes contiene una serie de accesorios, específicamente para controlar el paso de flujo se utilizan válvulas de bola y check, estas últimas son utilizadas cuando se tienen fluidos en contra corriente. Otro tipo de válvula insertada en la tubería de alimentación es la válvula check roma, la cual tiene doble función ya que debe permitir el flujo del alcohol en estado líquido pero no debe dejar pasar el vapor creado en el calentador.

Por otro lado y con el fin de reducir costos, en partes del proceso por las que no se generan altas temperaturas se optó por trabajar con válvulas, tuberías y tanques hechos en plástico. Los tanques de polietileno se utilizaron para recoger producto y preparar la solución, las tuberías y válvulas de PVC fueron utilizadas en partes de la unidad en donde el fluido no excedía los 50°C.

5.6 Montaje de la Unidad de Destilación

Luego de finalizar los diseños de cada una de las partes de la unidad de destilación y de haber procedido con la construcción de cada una

de ellas, como siguiente paso está el montaje de todo el equipo a su estructura metálica de soporte, de tal forma que todas las partes queden correctamente selladas y estables. Además de esto, se incorporaron las respectivas termocuplas en los diferentes puntos del sistema y un indicador de nivel en el calentador. Ver especificaciones de termocuplas en Anexo A9.

En primera estancia, se acopló el calentador a su estructura metálica ya que esta sirve de base para la siguiente parte del sistema, se colocaron 4 pernos en sus esquinas que se ajustaron con anillos planos, de presión y tuercas. En segundo lugar se procedió a incorporar la columna que está compuesta de dos tuberías de 3.5" de diámetro y bridadas en sus extremos, con su respectiva tapa final.

Por otro lado, se introdujo la tubería de cobre en el condensador para luego sellar con la brida y asegurar todo el equipo sobre el soporte. En la parte inferior del condensador quedan dos extremos de la tubería de cobre, por donde se coloca la manguera del refrigerante con ayuda de abrazaderas para mayor seguridad; la parte inicial de la manguera se encuentra conectada al grifo más cercano del Laboratorio de Operaciones Unitarias y la parte final está dirigida hacia un sumidero.

En la tercera parte del montaje del equipo, se acopla un visor. Mientras el refrigerante se envía a la alcantarilla, el producto obtenido en el condensador es enviado hacia el visor, el cual debe estar a una altura

específica según los cálculos realizados en el Capítulo 4 de este proyecto.

Finalmente, se colocan los tanques para alimentación, pre alimentación y producción; una vez colocados, se procede a unir por medio de tuberías, las partes de la unidad de destilación con sus respectivos accesorios. Ver Figura 5.7 (Esquema completo Autocad) para más detalles en accesorios introducidos.

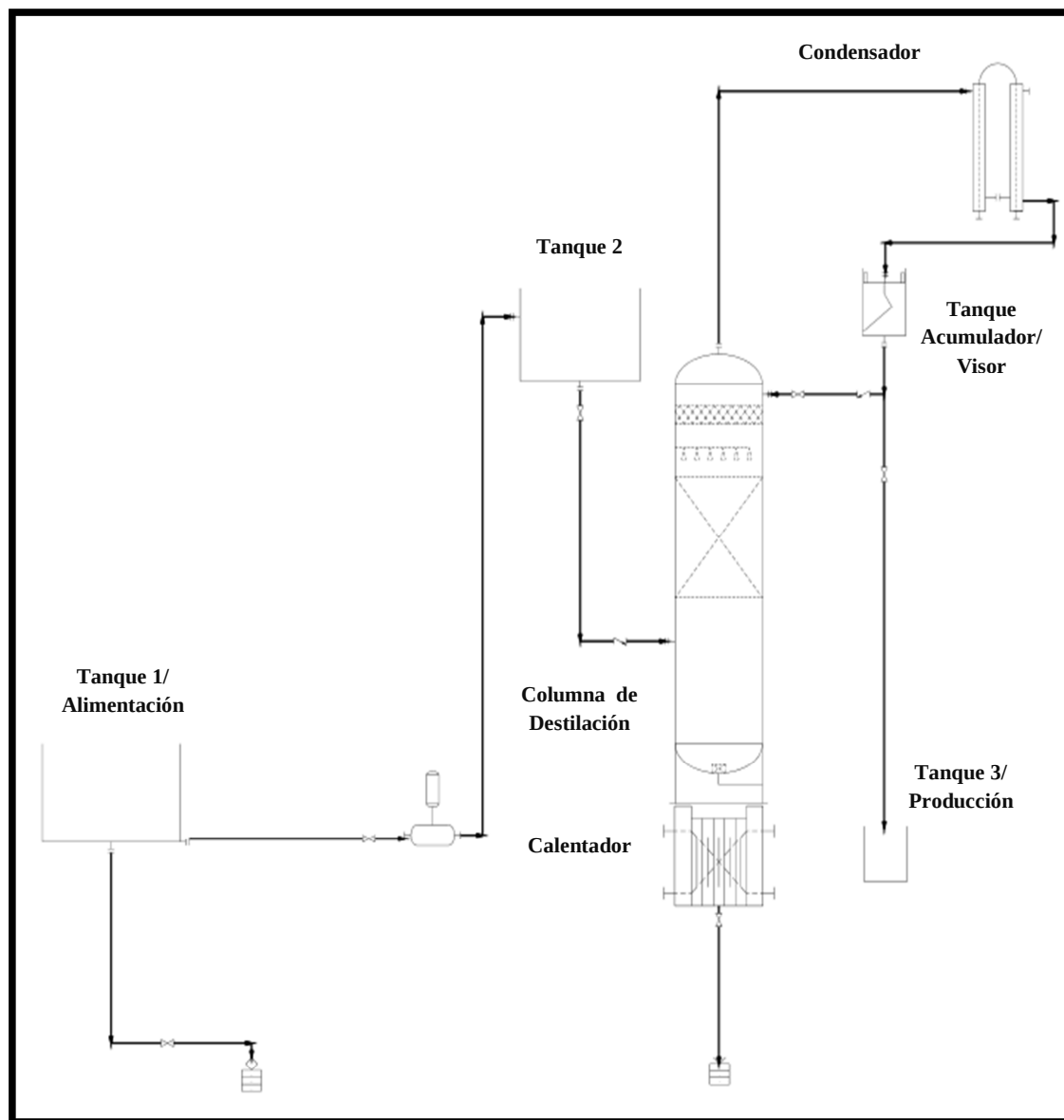


Figura 5.7. Esquema Completo de Unidad de Destilación

Fuente: Barcia A., León N.

5.7 Costos

Para lograr alcanzar el objetivo general de este proyecto, fue necesario incurrir en gastos tales como la compra de materiales, mano de obra, transporte, etc... En el Anexo A8 se muestra de forma detallada los costos unitarios.

Cada equipo de la unidad de destilación estará compuesto por accesorios que serán indispensables para su construcción, ya sea para evitar una corriente de vapor no deseada o para unificar dos líneas de dos equipos diferentes. Por lo que se procede a detallar un valor aproximado individual de cada parte del sistema en base a sus cortes, perforaciones, soldaduras.

Tabla X. Costos Totales de Cada Parte de la Unidad de Destilación

Sección de la unidad de destilación	Costo Total (\$)
Columna	65.06
Calentador	149.41
Condensador	115.50
Visor	92.44
Alimentación	131.46
Producción	13.00
Recirculación	55.58
Línea de vapor	17.38
Línea condensador – visor	8.85

Fuente: Barcia A., León N.

En la Tabla X de este capítulo se muestran costos totales de los diferentes sistemas empleados en la unidad de destilación, se ha tomado en cuenta, materiales, soldaduras y cortes los materiales restantes se los muestra en el Anexo A8. La columna también empleada en este sistema de destilación no se la compro en el

mercado si no fue un material obtenido del Laboratorio de Operaciones Unitarias por medio del Ing. Guillermo Cárdenas.

CAPÍTULO 6

PRUEBAS DE OPERACIÓN DEL EQUIPO EFECTUADAS

6. PRUEBAS DE OPERACIÓN DEL EQUIPO EFECTUADAS

Con el objetivo de garantizar la correcta operación del equipo y de establecer su eficiencia global, se realizaron múltiples pruebas experimentales registrando los resultados obtenidos. La realización de pruebas experimentales presenta muchas ventajas, entre ellas la determinación de parámetros que no se pueden definir de forma teórica, por ejemplo las aperturas de válvulas o los tiempos de llenado por gravedad; además ayudan a definir puntos muertos en el proceso para luego aplicar medidas correctivas y lograr la optimización del mismo.

La mezcla que será tratada con el equipo automático de destilación consiste en una disolución etanol al 20% Vol. y se obtuvo como producto final de la destilación, alcohol etílico en una concentración que oscilaba en el rango de 89 – 93% Vol., dependiendo este resultado de distintas consideraciones como serán mostradas en tablas a continuación.

Al iniciar el periodo de pruebas el primer punto de tiempo que se encontró en el proceso fue el tiempo de llenado del calentador, se tardaba 15 – 17 minutos aproximadamente el líquido en caer desde el recipiente TK-102 hasta el calentador. El siguiente factor de retardo fue la resistencia, la misma que al ser de 3000 Watts tardaba más de 40 minutos en calentar el líquido hasta la temperatura deseada por lo que se procedió a reemplazarla con una del doble de su potencia, es decir, 6000 Watts disminuyendo el tiempo de calentamiento a sólo 15 minutos.

Al inicio se controlaba la temperatura del líquido en el calentador, es decir T1, y se operaba a temperaturas entre 80°C y 93°C sin embargo el destilado que se obtenía tenía aproximadamente 84% de alcohol en volumen, lo cual era un valor alejado de la meta.

Luego se procedió a realizar pruebas controlando el sensor ubicado en el centro de la columna de destilación, T2, pero tampoco se obtuvieron resultados satisfactorios ya que el producto final tuvo una concentración de alcohol del 88 – 89% Vol.

Finalmente se decidió controlar la temperatura del vapor en el tope de la columna, T3, se concluyó que cuando la temperatura en este punto es de 79°C y es posible obtener destilado a 92°G.L. La temperatura máxima que se puede establecer para T3 es de 85°C y se obtiene alcohol a 80°G.L.

Con el fin de presentar los datos obtenidos en las pruebas de una forma más compacta y simplificada, se muestran en las Figuras 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4 los parámetros que permitieron establecer una relación entre el tiempo y la concentración esperada de alcohol.

Tabla XI. Parámetros Estables Durante la Operación

SECCIÓN	PARÁMETRO	VALOR
Alimentación	Caudal	15 Litros/hora
	Temperatura	Ambiente
	Concentración	20% Vol. en etanol
Columna	Presión	Atmosférica
Refrigerante	Caudal	100 litros/hora
Reflujo	Razón	1.75
Resistencia	Potencia	6000 Watts

Fuente: Barcia A., León N.

En la Tabla XI se muestran los parámetros que se mantuvieron estables durante la operación de las pruebas experimentales en las que se controló la temperatura en el sensor 3.

Por consiguiente se obtuvieron resultados que fueron tabulados para generar gráficos que permitieron establecer la temperatura óptima a la cual se controla el sensor de temperatura 3 para producir un alcohol a 92% Vol.

Tabla XII. Datos Obtenidos de la Prueba Experimental 1

PRUEBA EXPERIMENTAL #1					
Tiempo (Minutos)	Temperatura Establecida: 79°C				Tiempo al que cae la primera gota: 14 minutos 15 segundos
	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	
0	27.10	29.12	28.19	27.01	Concentración Final del Destilado: 92°C.L
5	91.87	88.62	79.56	28.62	
10	92.00	83.31	79.19	28.25	Caudal Promedio de Producción: 0.87L·h ⁻¹
15	92.62	83.75	79.56	28.25	
20	92.87	82.31	79.37	28.25	Tiempo Total de Operación: 329.12 minutos
25	93.12	85.00	79.37	28.19	

Fuente: Barcia A., León N.

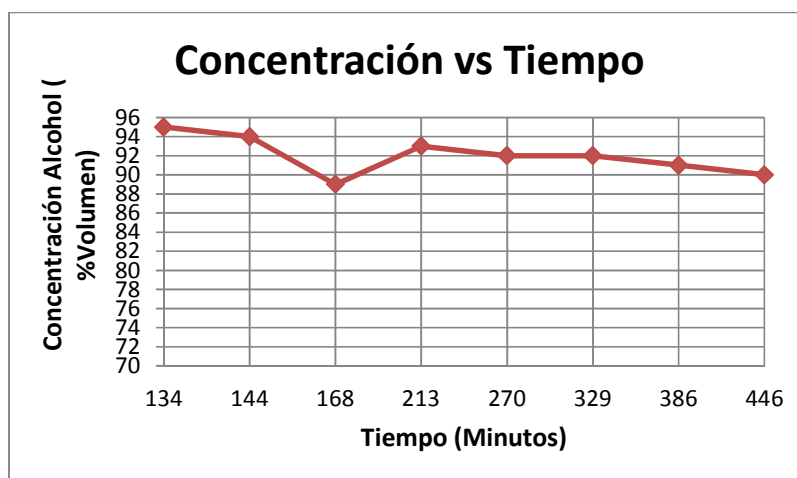


Figura 6.1. Gráfico de Concentración Vs Tiempo para Prueba 1

Fuente: Barcia A., León N.

Tabla XIII. Datos Obtenidos de la Prueba Experimental 2

PRUEBA EXPERIMENTAL #2					
Tiempo (Minutos)	Temperatura Establecida: 81°C				Tiempo al que cae la primera gota: 14 minutos 28 segundos
	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	
0	27.06	29.12	27.19	27.31	Concentración Final del Destilado: 88°C.L
5	58.94	28.44	27.19	27.31	
10	88.06	28.56	27.19	27.19	Caudal Promedio de Producción: 1.46 L·h ⁻¹
15	96.25	84.37	81.56	28.12	
20	94.94	87.69	81.56	28.06	Tiempo Total de Operación: 288.31 minutos
25	94.31	88.50	81.25	28.06	

Fuente: Barcia A., León N.

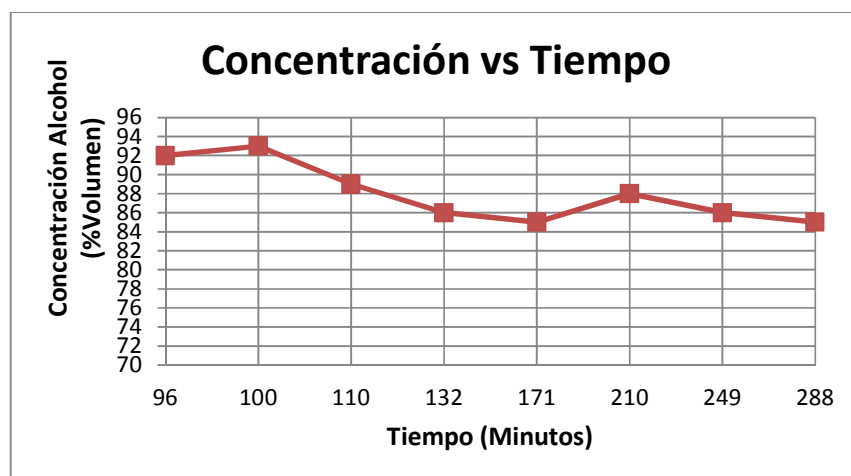


Figura 6.2. Gráfico de Concentración Vs Tiempo para Prueba 2

Fuente: Barcia A., León N.

Tabla XIV. Datos Obtenidos de la Prueba Experimental 3

PRUEBA EXPERIMENTAL #3					
Tiempo (Minutos)	Temperatura Establecida: 83°C				Tiempo al que cae la primera gota: 15 minutos 20 segundos
	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	
0	25.5	26.56	25.5	25.5	Concentración Final del Destilado: 85°C.L
5	56.31	26.56	25.69	25.62	
10	83.87	26.69	25.75	25.81	Caudal Promedio de Producción: 1.10 L·h ⁻¹
15	94.25	83.19	81.19	27.31	
20	96.12	85.69	83	27.5	Tiempo Total de Operación: 264.49
25	95.69	88.31	83.25	27.62	

Fuente: Barcia A., León N.

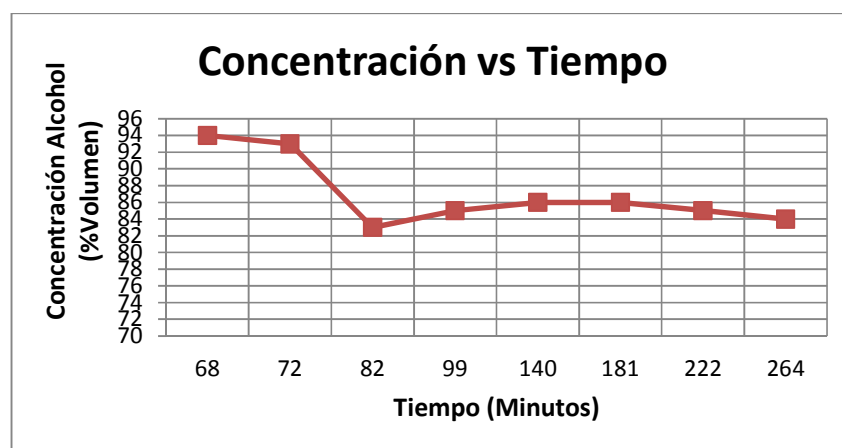


Figura 6.3. Gráfico de Concentración Vs Tiempo para Prueba 3

Fuente: Barcia A., León N.

Tabla XV. Datos Obtenidos de la Prueba Experimental 4

PRUEBA EXPERIMENTAL #4					
Tiempo (Minutos)	Temperatura Establecida: 85°C				Tiempo al que cae la primera gota: 15 minutos 04 segundos
	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	
0	26.0	27.56	24.5	24.5	Concentración Final del Destilado: 80°C.L
5	60.25	31.50	50.75	29.31	
10	89.62	31.25	50.81	29.25	Caudal Promedio de Producción: 3.75 L·h ⁻¹
15	98.12	85.87	82.62	30.06	
20	98.25	94.00	85.87	29.94	Tiempo Total de Operación: 89.88 minutos
25	94.25	89.69	89.06	29.62	

Fuente: Barcia A., León N.

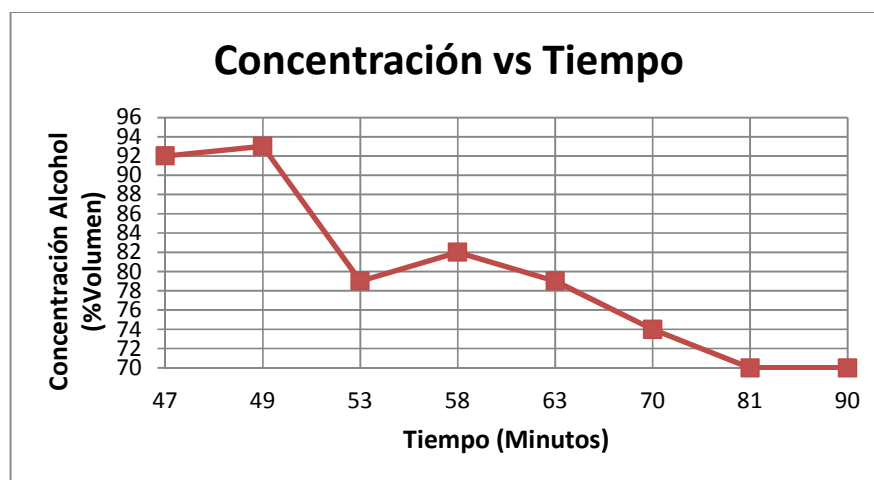


Figura 6.4. Gráfico de Concentración Vs Tiempo para Prueba 4

Fuente: Barcia A., León N.

CAPÍTULO 7

MANUAL DE OPERACIÓN

7. MANUAL DE OPERACIÓN

La operación de la Unidad de Destilación se divide en 3 partes: el encendido, la destilación y el apagado. La puesta en marcha debe realizarse siguiendo cada una de las indicaciones descritas en el manual a continuación:

I. ENCENDIDO DEL EQUIPO

Preparación del Estante de Trabajo

1. Preparar una solución de alcohol al 20% Vol. diluido en agua potable a partir de una solución de alcohol industrial concentrado. Luego verter esta solución al recipiente TK-101. (*Capacidad mínima 13L/ máxima 22L.*)
2. Revisar que en la caja eléctrica se encuentren apagados los breakers tanto de la bomba como de la resistencia. Ver Figura 7.1

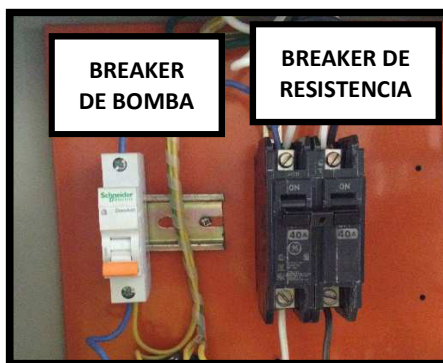


Figura 7.1. Breakers que se Muestran en Caja Eléctrica

Fuente: Barcia A., León N.

3. Encender el breaker general que se encuentra en la parte posterior del Laboratorio de Operaciones Unitarias. Ver Figura 7.2

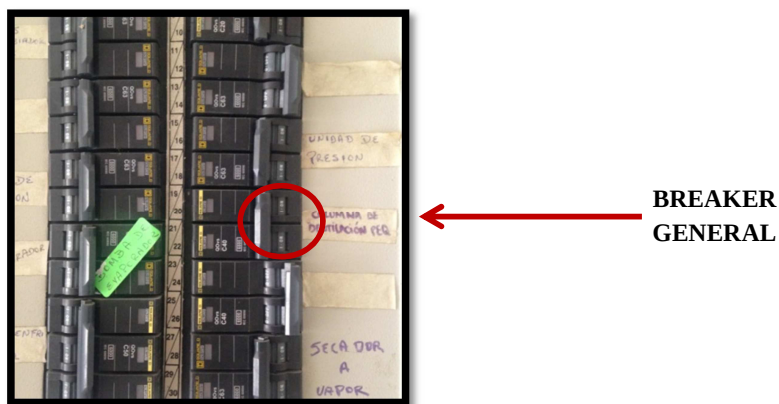


Figura 7.2. Panel de Breaker General de Laboratorio de Operaciones Unitarias ESPOL

Fuente: Barcia A., León N.

Bombeo de Alimentación

4. Abrir la válvula V-101 para luego encender el breaker de la bomba y el de la resistencia, ubicados en la caja eléctrica de la Unidad. Encender la bomba, accionando el selector de la misma según se muestra en la Figura 7.3 y a continuación se encenderá la luz que indica que la bomba está en operación, con esto se logra que el líquido colocado en el tanque TK-101 ascienda hasta el tanque TK-102.

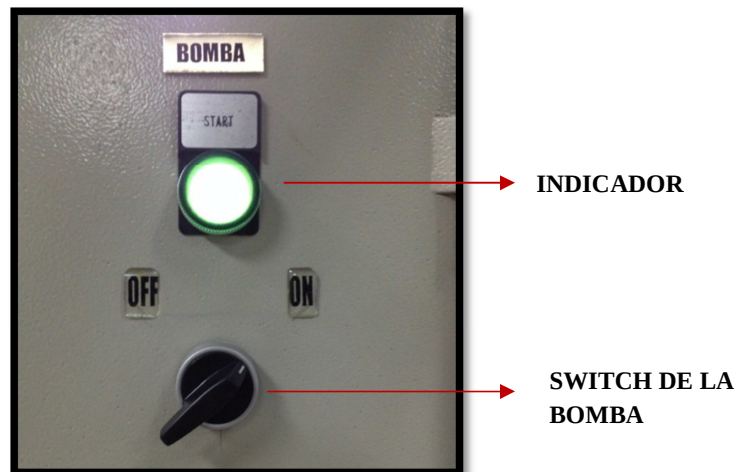


Figura 7.3. Switch de Bomba

Fuente: Barcia A., León N.

5. Apagar el selector de la bomba, una vez que la bomba ya no pueda absorber más líquido del tanque TK-101, observando su nivel. Ahora la mezcla se encuentra en el tanque TK-101.
6. Encender el switch de la pantalla, Figura 7.4, que es en donde se mostrarán los datos censados durante la operación.

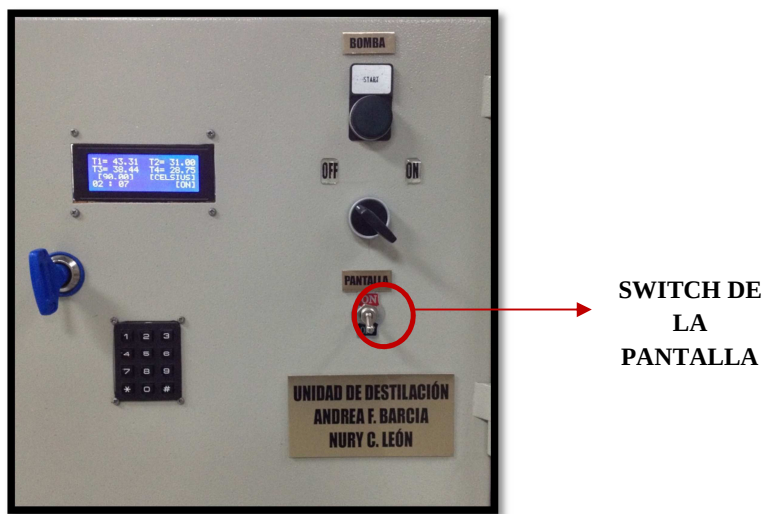


Figura 7.4. Switch de la Pantalla

Fuente: Barcia A., León N.

7. Abrir completamente las válvulas V-102 y V-105 y verificar que la válvula V-103 esté cerrada.

Encendido de la Resistencia

8. Una vez encendida la pantalla como se indicó en el paso 6, aparecerá un mensaje que pide al usuario indicar el sensor a controlar, es decir, "Choose Sensor". El usuario podrá oprimir en el teclado y seleccionar entre los sensores 1, 2 o 3 según su objetivo o sus consideraciones, se aconseja controlar el sensor 3 por resultados obtenidos en Capítulo 6.



Figura 7.5. Pantalla para Selección de Temperatura

Fuente: Barcia A., León N.

9. Luego se mostrará en la pantalla el mensaje “Set Temperature” acompañado de un signo de admiración. (!) tal como se muestra en la Figura 7.6.

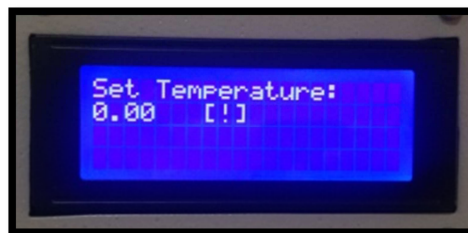


Figura 7.6. Pantalla para Establecer Temperatura

Fuente: Barcia A., León N.

El signo de admiración significa que el calentador NO posee un nivel de líquido adecuado para empezar a funcionar ya que la resistencia no puede operar si no tiene líquido a su alrededor, por lo tanto se debe esperar por

aproximadamente 16 minutos a que el líquido caiga del tanque TK-102 al calentador.

II. DESTILACIÓN

10. Al alcanzar el nivel requerido en el calentador el signo de admiración desaparecerá inmediatamente y la pantalla quedará como se muestra en la Figura 7.7.

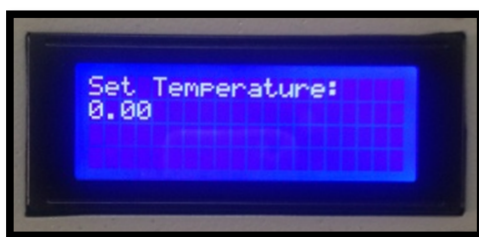


Figura 7.7. Pantalla Indica Nivel Adecuado de Solución

Fuente: Barcia A., León N.

11. Cerrar la válvula V-102, verificar que la válvula V-105 esté abierta y todas las demás válvulas cerradas.
12. Digitar en el teclado la temperatura de operación, en este caso al tratarse de una mezcla etanol-agua y si se está controlando la temperatura en el sensor 3, el rango de operación debe ser entre 79 – 85 grados centígrados. Es importante tomar en consideración que a mayor temperatura el destilado se obtendrá menor concentración de alcohol y viceversa, además para un mejor manejo del equipo se estableció en la resistencia un rango de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, es decir, si por ejemplo

se establece una temperatura de 90°C, la resistencia se apagará cuando el líquido en el calentador (T3) esté a 91°C y se volverá a encender cuando se enfríe hasta 90°C.

13. Abrir el paso de agua del grifo más cercano al equipo que se encuentra ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, verificar la salida del agua en el otro extremo de la manguera. El agua funcionará como líquido refrigerante para la operación del condensador de la Unidad de Destilación.
14. En la pantalla aparecerán los diferentes valores de temperatura sensados por T1, T2, T3 y T4, e irán cambiando en el transcurso de la operación. Se muestra también la temperatura escogida entre corchetes [90], el tiempo de operación y si la resistencia se encuentra encendida o apagada. (On / Off). Véase Figura 7.8

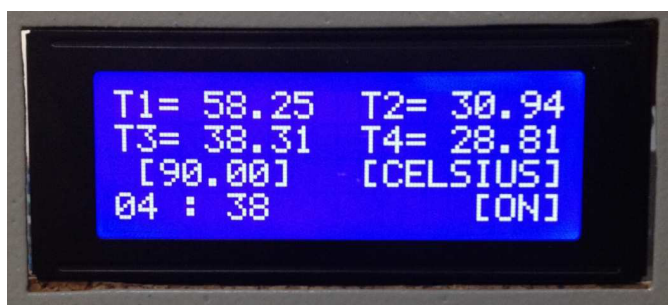


Figura 7.8. Resistencia Operando y Sensores de Temperatura

Encendidos.

Fuente: Barcia A., León N.

15. El cambio de temperatura en los sensores T2 y T3 no es gradual, más bien se da de una forma repentina, luego de 13 minutos de operación sus temperaturas serán cercanas a 80°C.
16. Uno o dos minutos después se observará condensado en el tanque acumulador TA-101 y en ese momento se debe cerrar la válvula V-105.
17. Esperar que se llenen las $\frac{3}{4}$ partes del recipiente TA-101 para luego accionar manualmente las válvulas V-104 y V-105 con el fin de permitir el paso del flujo de condensado nuevamente a la columna T-101 y obtener un flujo de producción en el recipiente TK-103.

III. APAGADO DEL EQUIPO

Al finalizar la práctica se deben de tomar en cuenta los siguientes puntos para lograr un apagado exitoso del sistema de destilación:

18. Cerrar válvulas V-104 y V-105.
19. Cerrar paso de agua de refrigeración por manguera hacia el condensador.
20. Reiniciar el panel manteniendo presionado la tecla # en el teclado ubicado en la caja eléctrica. Aparecerá un mensaje como se muestra en la Figura 7.9 lo cual indica que la resistencia se apagará inmediatamente.



Figura 7.9. Reiniciando el Sistema

Fuente: Barcia A., León N.

21. Bajar los breakers de la bomba, resistencia y finalmente el breaker general.
22. Drenar el producto de cola del calentador del equipo por medio de la válvula de purga V-103.

En la guía operativa mostrada en el Anexo A10 se encuentra más detalle de la operación y funcionamiento de la unidad de destilación.

7.1 MEMORIA TÉCNICA

7.1.1 COLUMNA DE DESTILACIÓN

La columna de destilación está constituida principalmente por un tubo de acero inoxidable cédula 40 de 0.07 pulgadas de espesor, diámetro de 3.5 pulgadas y una altura de 49.2 pulgadas, sin incluir los 15.7 pulgadas de altura del calentador. En su interior se encuentran 2 placas perforadas de 0.07 pulgadas de espesor,

con arreglo triangular que servirán de soporte para el relleno, el cual consta de esferas de vidrio con una masa aproximada de 0.011 lb y un diámetro de 0.47 pulgadas.

La columna posee 6 bridas soldadas a cada sección de tubería y entre cada par de bridas se encuentra un empaque de neopreno y aceite para mantener hermética la columna, evitar el desgaste por fricción de las piezas metálicas y las pérdidas de presión. Las bridas son ajustadas con pernos de acero inoxidable de 5/16 – 18x1 y sus correspondientes tuercas, anillos planos y de presión. La distancia entre bridas y la placa de soporte es de 1.96 pulgadas.

Se utilizó soldadura con electrodo para acero inoxidable.

7.1.1.1 DIAGRAMA DE LA COLUMNA

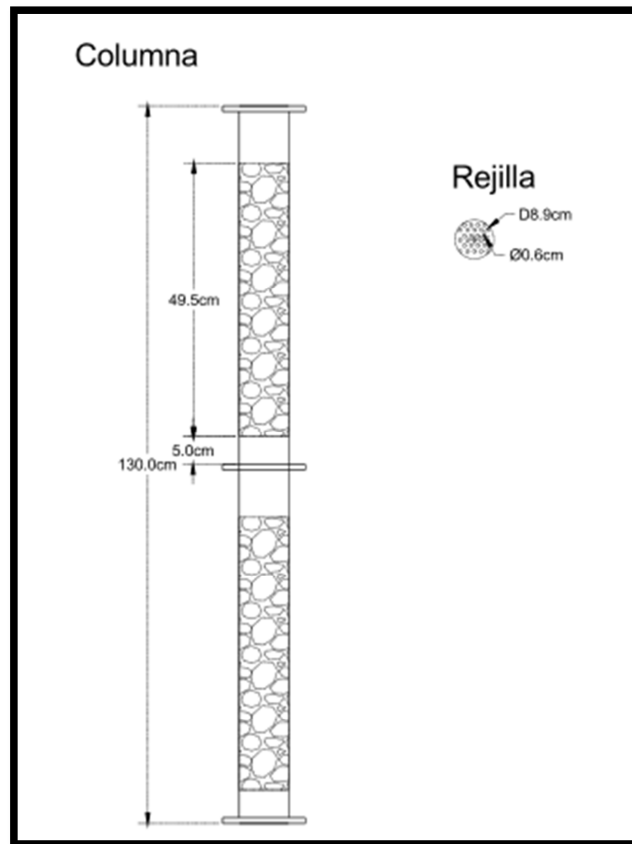


Figura 7.10. Dimensiones de la Columna de Destilación de Lecho Empacado

Fuente: Barcia A., León N.

Columna de Destilación

Material: Acero Inoxidable

Altura: 130cm

Diametro: 8.9cm

Altura de empaque: 49.5cm

Distancias:

Brida – Empaque: 5cm

Brida – Reboiler: 5cm

7.1.2 CALENTADOR

El equipo consta de un calentador elaborado en acero inoxidable de espesor 0.07 pulgadas, tiene un diámetro de 10.5 pulgadas y 17.7 pulgadas de largo. Posee una tapa removible con 2 bridas laterales soldadas usando electrodos de argón, empaque de neopreno y aceite, ajustadas con pernos de 5/16 – 18x1, anillos planos y anillos de presión. Debido a que no se trabaja con vapor para generar calor, se incorporó una resistencia de 6000 W conectada a un breaker y un relé para poner en funcionamiento el equipo.

Se realizó una conexión directa con la resistencia, el relé y el breaker ya que esto se controlará con el microprocesador que dará el set point de la temperatura. Ya que el punto de ebullición del alcohol es de 80°C se establecerá una temperatura aproximada a este valor.

La resistencia de marca CAMCO es de material acero inoxidable y tiene una longitud de 16.9 pulgadas, es de tipo foldback y enroscable.

Además se insertó una termocupla que permite el control de la temperatura al momento de encender y apagar la resistencia. Esta termocupla puede encontrarse entre -55°C a 125 °C, y tiene

una longitud de 1.96 pulgadas siendo su material de acero inoxidable.

Para un correcto uso del calentador se requiere que el nivel al interior del tanque sea de las $\frac{3}{4}$ partes de la capacidad de este.

En la parte baja del calentador se ubicó la purga, que se usará durante los mantenimientos del equipo y para muestreo en caso de ser necesario.

7.1.2.1 DIAGRAMA DEL CALENTADOR

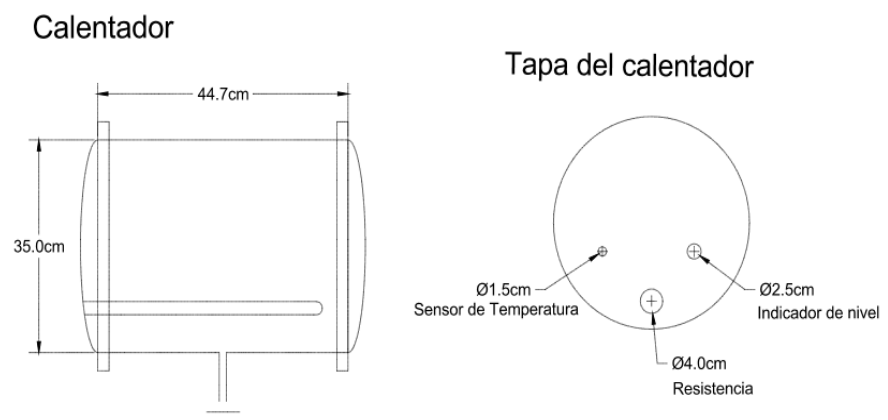


Figura 7.11 Dimensiones del Calentador

Fuente: Barcia A., León N.

Calentador

Material: Acero Inoxidable

Ancho: 35cm

Largo: 44.7cm

Potencia resistencia: 6000W – 240V

Capacidad Total: 20L

7.1.3 CONDENSADOR

El sistema consta de un condensador elaborado en acero inoxidable de espesor 0.07 pulgadas, tiene un diámetro de 3.5 pulgadas y 23.6 pulgadas de largo. Posee una tapa removible con 1 brida en la parte inferior soldada usando electrodos de argón, empaque de neopreno y aceite, la misma que ha sido ajustada con pernos de 5/16 – 18x1, anillos planos y anillos de presión. El condensador además posee una tubería de cobre de 0.51” de diámetro en su interior, doblada formando un arreglo cuadrado para aumentar la superficie de contacto entre el vapor y el líquido refrigerante.

En la parte inferior del condensador se ubica una termocupla que indicará la temperatura a la que se encuentre el condensado de alcohol durante la operación del sistema. De la misma forma tendrá la salida y entrada de la tubería de cobre que será por donde circulará el líquido refrigerante del condensador.

7.1.3.1 DIAGRAMA DEL CONDENSADOR

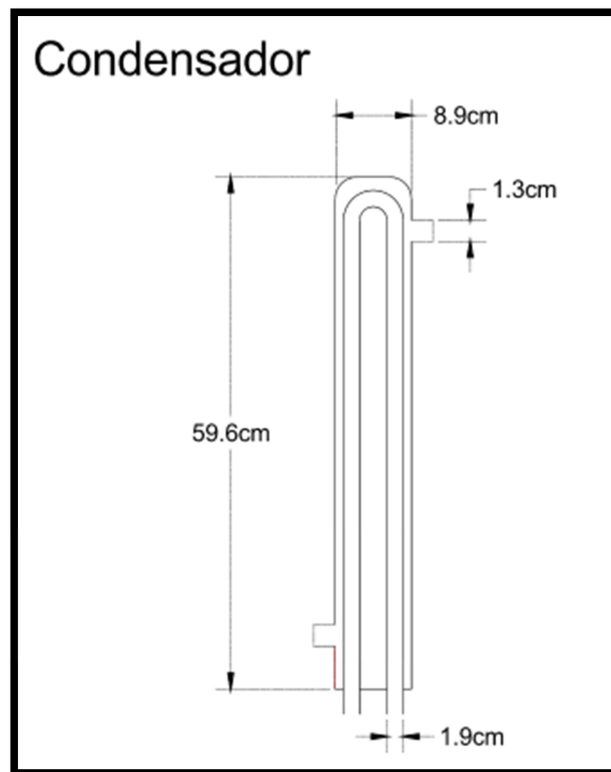


Figura 7.12 Dimensiones del Condensador

Fuente: Barcia A., León N.

Condensador

Material: Acero Inoxidable

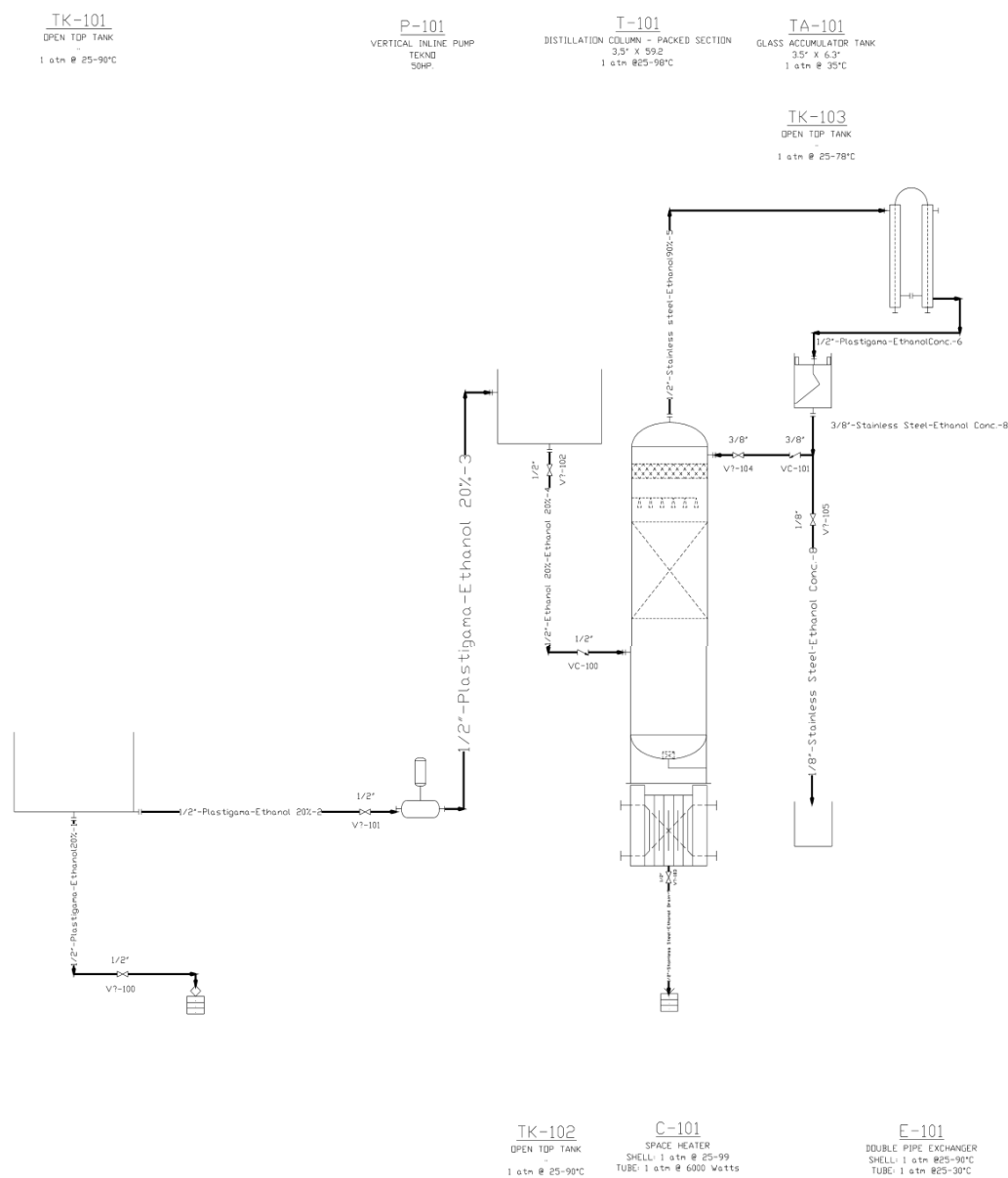
Ancho: 8.9cm

Largo: 60cm

Tubería de cobre interna

Diámetro: 1.9 cm

7.1.4 DIAGRAMA DE LA UNIDAD DE DESTILACION DE LECHO EMPACADO



Fuente: Barcia A., León N.

7.2 EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL

Se considera de vital importancia la protección y seguridad del personal que opera la Unidad de Destilación, de esta forma con el fin de minimizar o impedir la incidencia de accidentes se detalla a continuación el Equipo de Protección Personal (EPP) que se deberá usar al momento de operar el equipo:

ZONAL DEL CUERPO	EPP	PRINCIPAL RIESGO	IMAGEN
Cabeza	Casco	- Caída de altura.	
		- Proyección violenta de objetos sobre la cabeza	
Protección Respiratoria	Mascarilla desechable	Inhalación de vapores concentrados de etanol.	
Ojos	Anteojos de protección	- Salpicaduras de líquidos muy fríos o calientes.	
		- Exposición a vapores concentrados de etanol.	
Extremidades	Guantes	- Cortes o quemaduras por exposición a objetos calientes.	
		- Contactos de tipo eléctrico	
	Botas puntas de acero	- Caídas, proyecciones de objetos o golpes.	
		- Inflamabilidad o explosión.	
		- Contacto con objetos calientes.	
	Ropa de Protección	- Salpicaduras de líquidos muy fríos o calientes.	

Fuente: Barcia A., León N.

7.3 Mantenimiento Preventivo

El objetivo primordial del mantenimiento preventivo es predecir posibles fallas o daños futuros en el equipo, basándose en el análisis de vida útil de los componentes del equipo y en la vigilancia constante del mismo. Este mantenimiento tiene entre sus ventajas a destacar: la disminución de costos de reparación, el ahorro de tiempo por paradas imprevistas, el alargamiento de la vida útil del equipo y el aumento de la productividad.

Con el fin de llevar a cabo el mantenimiento de forma eficaz y ordenada, se deben de programar las revisiones y llevar registros o controles de las mismas, a continuación se establece un cronograma de revisiones para el año 2015 en el cual se podrán incluir las revisiones que el operador considere necesarias.

Tabla XVI. Mantenimiento Preventivo por Mes

FECHA	PIEZA / EQUIPO	DESCRIPCIÓN DEL MANTENIMIENTO
Marzo	Columna	- Revisión en busca de incrustaciones o partes oxidadas. - Verificar el estado del relleno de la columna.
Abril	Válvulas	- Verificar su correcto funcionamiento.
Mayo	Visor de Condensado	- Limpieza del visor y revisión del mismo en busca de fisuras.
Junio	Condensador	- Revisión en busca de incrustaciones, partes oxidadas o fisuras en la tubería de cobre.
Julio	Bomba	- Verificar el correcto funcionamiento de la turbina que se encuentra en el interior de la bomba.
Agosto	Equipo en general	- Buscar fugas en todo el equipo.
Septiembre	Sensores	- Medir el paso de corriente. - Verificar su correcto funcionamiento.
Octubre	Conexiones eléctricas	- Verificar el correcto funcionamiento de los equipos eléctricos.

Fuente: Barcia A., León N.

Con el fin de obtener un buen funcionamiento del equipo es importante tomar en cuenta que en caso de existir algún problema se deberá de separar las piezas necesarias para así poder llegar a encontrar ya sea la obstrucción o fisura que está causando dicho mal comportamiento.

La unidad de destilación está diseñada de tal forma que el usuario que la opera tenga la facilidad de desmontar el equipo en minutos por medio de sus acoples universales que permiten descomponer en partes ya sea tuberías o separar componentes de la unidad.

En caso de existir algún problema eléctrico se deberá de recurrir algún electricista que le facilita la solución al operario en caso de no poder corregirla.

7.4 Mantenimiento Correctivo

El mantenimiento correctivo consiste en reparar el daño luego de que el incidente se ha suscitado pero este mantenimiento representará costos más altos que el preventivo.

Con el fin de informar a los usuarios del equipo se procede a señalar las posibles fallas que se podrían presentar en la Unidad de Destilación, entre ellas se tiene:

- Fugas entre soldadura o uniones.
- Avería de válvulas.
- Fallas eléctricas.
- Obstrucción de las tuberías.

- Fallas mecánicas en la bomba.
- Entre otros.

Ante cualquiera de estas fallas, es de suma importancia que al instante en que se presente el problema se proceda a bajar el breaker general del equipo, para de esta manera evitar accidentes más graves. Se deberá realizar un análisis causa-consecuencia para determinar la raíz de la falla y para prevenir futuros errores y a continuación se debe solicitar al departamento administrativo de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas la reparación del equipo.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se hace referencia en forma de resumen, a los puntos más importantes relacionados con los resultados que se obtuvieron en el desarrollo del proyecto, los mismos que fueron explicados ampliamente en el desarrollo del cuerpo de la presente tesis.

Además se detallan sugerencias o recomendaciones al operador de la Unidad de Destilación, las cuales se basan en las pruebas realizadas en el mismo y contribuyen a una mejor operación del equipo.

8.1 Conclusiones

- Se identificaron los equipos que conformarían la Unidad de Destilación y se procedió a definir las variables de diseño de cada uno de ellos. El equipo principal de la Unidad es la columna de destilación de lecho empacado, cuyas dimensiones son 3.94 pies de altura x 3.5" de diámetro y cuyo relleno consiste en aproximadamente 120 esferas de vidrio. La Unidad de Destilación está en la capacidad de tratar $31.12 \text{ lb} \cdot \text{h}^{-1}$ de mezcla etanol – agua y al introducir la mezcla al 20% Vol. se puede obtener producto con una concentración del 80% – 92% Vol. en etanol.
- Se realizó la simulación de la operación de destilación en “Chemcad”, utilizando datos como la concentración a la que se encuentra la mezcla de alimentación (20% Vol.), la presión (1 atm)

a la que se desea operar la mezcla, el tipo de condensador a utilizar y la razón de reflujo (3). Los datos obtenidos de la simulación tienen un error del 15% - 0% en comparación a los realizados manualmente con las ecuaciones de diseño.

- Mediante pruebas realizadas como las que se mostraron en el capítulo 7 de esta tesis, se determinaron las condiciones óptimas a las cuales se deberá operar la columna para obtener una concentración elevada de una solución de alcohol. Sin embargo, es importante considerar el tiempo empleado en la práctica, ya que al querer obtener una concentración del 92% Vol. en solución se necesitará al menos 3 horas de destilación. Por lo tanto a mayor tiempo, mayor será la concentración y viceversa menor tiempo, se obtendrá una menor concentración.
- Se elaboró un manual de operaciones en donde se detallan cada uno de los pasos que el operador deberá seguir para un correcto funcionamiento del equipo y para evitar cualquier error y daño al equipo. Este equipo está diseñado para realizar prácticas de laboratorios con varios tipos de soluciones conociendo sus puntos de ebullición para establecer en el panel de control como lo indica el manual de operaciones.

8.2 Recomendaciones

- Se recomienda después de cada práctica, sacar la solución con la que se trabajó y dejar la válvula de purga abierta completamente para evitar restos en el equipo.
- Realizar el mantenimiento preventivo en base al cronograma mostrado en Capítulo 7 Manual de Operaciones Tabla XVI, de esta forma se aumenta la vida útil del equipo.
- Mantener el nivel del líquido en el calentador al momento de encender la resistencia para evitar que esta produzca corto circuito por no estar sumergida en líquido.
- Colocar lana de vidrio alrededor de toda la columna para incrementar eficiencia del equipo y de la misma forma evitar quemaduras a personas externas.
- Leer el manual de operaciones antes de manipular el equipo para conocer su funcionamiento, apretura de válvulas, cierre de ellas, toma de datos, entre otros.

ANEXOS

ANEXO A

ANEXO A1

Propiedades de líquidos y sólidos

TABLA A-3E

Propiedades de líquidos, sólidos y alimentos comunes

a) Líquidos

Sustancia	Datos de ebullición a 1 atm		Datos de congelación		Propiedades de líquido		
	Punto normal de ebullición, °F	Calor latente de vaporización, h_{fg} Btu/lbm	Punto de congelación, °F	Calor latente de fusión, h_{if} Btu/lbm	Temperatura, °F	Densidad, ρ lbm/ft ³	Calor específico, c_p Btu/lbm · R
Aceite (ligero)	—	—			77	56.8	0.430
Agua	212	970.1	32	143.5	32	62.4	1.01
					90	62.1	1.00
					150	61.2	1.00
					212	59.8	1.01
Alcohol etílico	173.5	368	-248.8	46.4	68	49.3	0.678
Amoníaco	-27.9	24.54	-107.9	138.6	-27.9	42.6	1.06
					0	41.3	1.083
					40	39.5	1.103
					80	37.5	1.135
Argón	-302.6	69.5	-308.7	12.0	-302.6	87.0	0.272
Benceno	176.4	169.4	41.9	54.2	68	54.9	0.411
n-Butano	31.1	165.6	-217.3	34.5	31.1	37.5	0.552
Dióxido de carbono	-109.2*	99.6 (at 32°F)	-69.8	—	32	57.8	0.583
Etanol	172.8	360.5	-173.6	46.9	77	48.9	0.588
Etilén glicol	388.6	344.0	12.6	77.9	68	69.2	0.678
Glicerina	355.8	419	66.0	86.3	68	78.7	0.554
Helio	-452.1	9.80	—	—	-452.1	9.13	5.45
Hidrógeno	-423.0	191.7	-434.5	25.6	-423.0	4.41	2.39
Isobutano	10.9	157.8	-255.5	45.5	10.9	37.1	0.545
Mercurio	674.1	126.7	-38.0	4.90	77	847	0.033
Metano	-258.7	219.6	296.0	25.1	-258.7	26.4	0.834
					-160	20.0	1.074
Metanol	148.1	473	-143.9	42.7	77	49.1	0.609
Nitrógeno	-320.4	85.4	-346.0	10.9	-320.4	50.5	0.492
					-260	38.2	0.643
Octano	256.6	131.7	-71.5	77.9	68	43.9	0.502
Oxígeno	-297.3	91.5	-361.8	5.9	-297.3	71.2	0.408
Petróleo	—	99-165	—	—	68	40.0	0.478
Propano	-43.7	184.0	-305.8	34.4	-43.7	36.3	0.538
					32	33.0	0.604
					100	29.4	0.673
Salmuera (20% de cloruro de sodio por masa)	219.0	—	0.7	—	68	71.8	0.743
Queroseno	399-559	108	-12.8	—	68	51.2	0.478
Refrigerante 134a	-15.0	93.3	-141.9	—	-40	88.5	0.283
					-15	86.0	0.294
					32	80.9	0.318
					90	73.6	0.348

*Temperatura de sublimación. (A presiones por debajo de la presión de punto triple de 75.1 psia, el dióxido de carbono existe como sólido o como gas. También, la temperatura de punto de congelamiento del dióxido de carbono es la temperatura de punto triple de -69.8°F.)

Fuente: Termodinámica; Yunus A. Cengel, Michael A. Boles; Ed. Mc Graw Hill; Sexta Edición; 2008

ANEXO A2

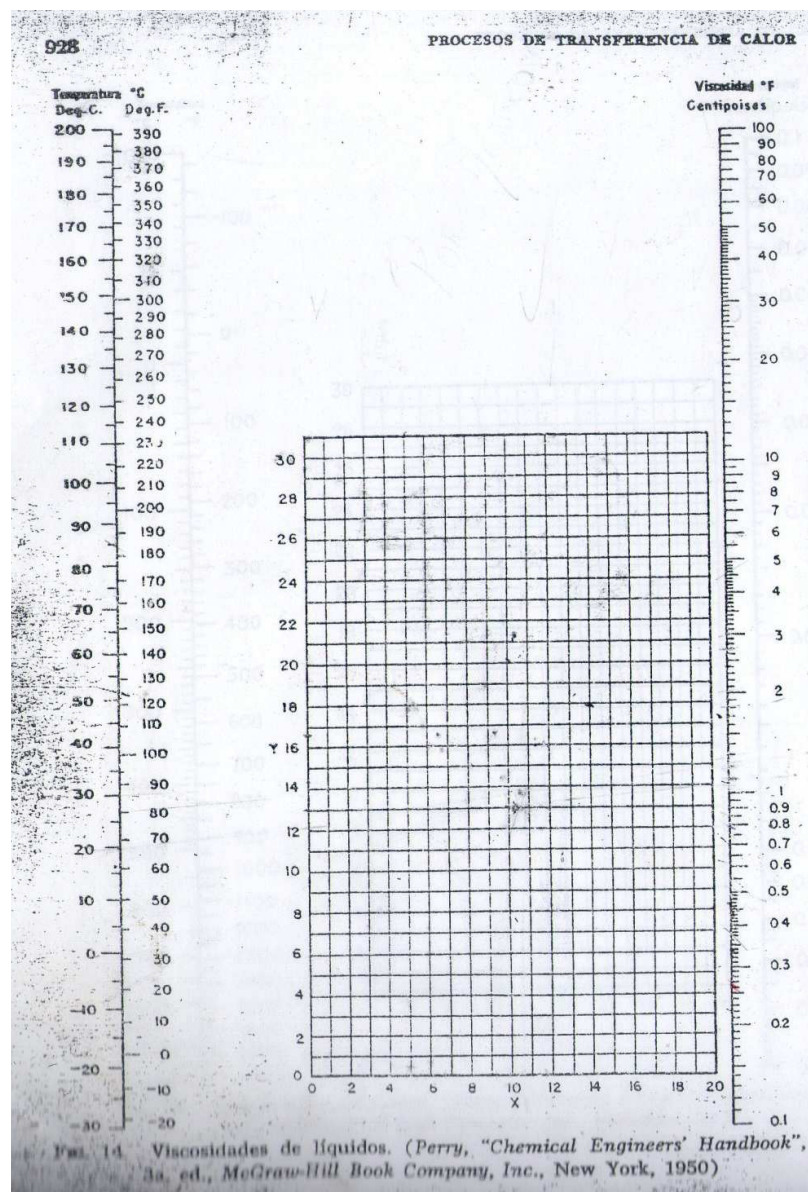
Viscosidad de gases – Parte 1

Para usarse como COORDENADAS PARA LAS CURVAS DE VISCOSIDAD

Gas	X	Y
Acetato de Etilo	8.5	13.2
Acetona	8.9	13.0
Acetileno	9.8	14.9
Acido Acético	7.7	14.3
Agua	8.0	16.0
Aire	11.0	20.0
Alcohol Etilico	9.2	14.2
Alcohol Metilico	8.5	15.6
Alcohol Propilico	8.4	13.4
Amoniaco	8.4	16.0
Argón	10.5	22.4
Benceno	8.5	13.2
Bromo	8.9	19.2
Buteno	9.2	13.7
Butileno	8.9	13.0
Bióxido de Azufre	9.6	17.0
Bióxido de Carbono	9.5	18.7
Bisulfuro de Carbono	8.0	16.0
Bromuro de Hidrógeno	8.8	20.9
Cianógeno	9.2	15.2
Ciclohexano	9.2	12.0
Cianuro de Hidrógeno	9.8	14.9
Cloro	9.0	18.4
Cloroformo	8.9	15.7
Cloruro de Etilo	8.5	15.6
Cloruro de Hidrógeno	8.8	18.7
Cloruro de Nitrosilo	8.0	17.6
Etano	9.1	14.5
Eter Etilico	8.9	13.0
Etileno	9.5	15.1
Flúor	7.3	23.8
Freon 11	10.6	15.1
Freon 12	11.1	16.0
Freon 21	10.8	15.3
Freon 22	10.1	17.0
Freon 113	11.3	14.0
Helio	10.9	20.5
Hexano	8.6	11.8
Hidrógeno	11.2	12.4
3H ₂ + 1N ₂	11.2	17.2
Yodo	9.0	18.4
Yoduro de Hidrógeno	9.0	21.3
Mercurio	5.3	22.9
Metano	9.9	15.5
Monóxido de Carbono	11.0	20.0
Nitrógeno	10.6	20.0
Oxido Nítrico	10.9	20.5
Oxido Nitroso	8.8	19.0
Oxígeno	11.0	21.3
Pentano	7.0	12.8
Propano	9.7	12.9
Propileno	9.0	13.8
Sulfuro de Hidrógeno	8.6	18.0
Tolueno	8.6	12.4
2, 3, 3-Trimetilbutano	9.5	10.5
Xenón	9.3	23.0

Fuente: Chemical Engineers' Handbook; Perry; 3d ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1950

Viscosidad de gases – Parte 2



Fuente: Chemical Engineers' Handbook; Perry; 3d ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1950

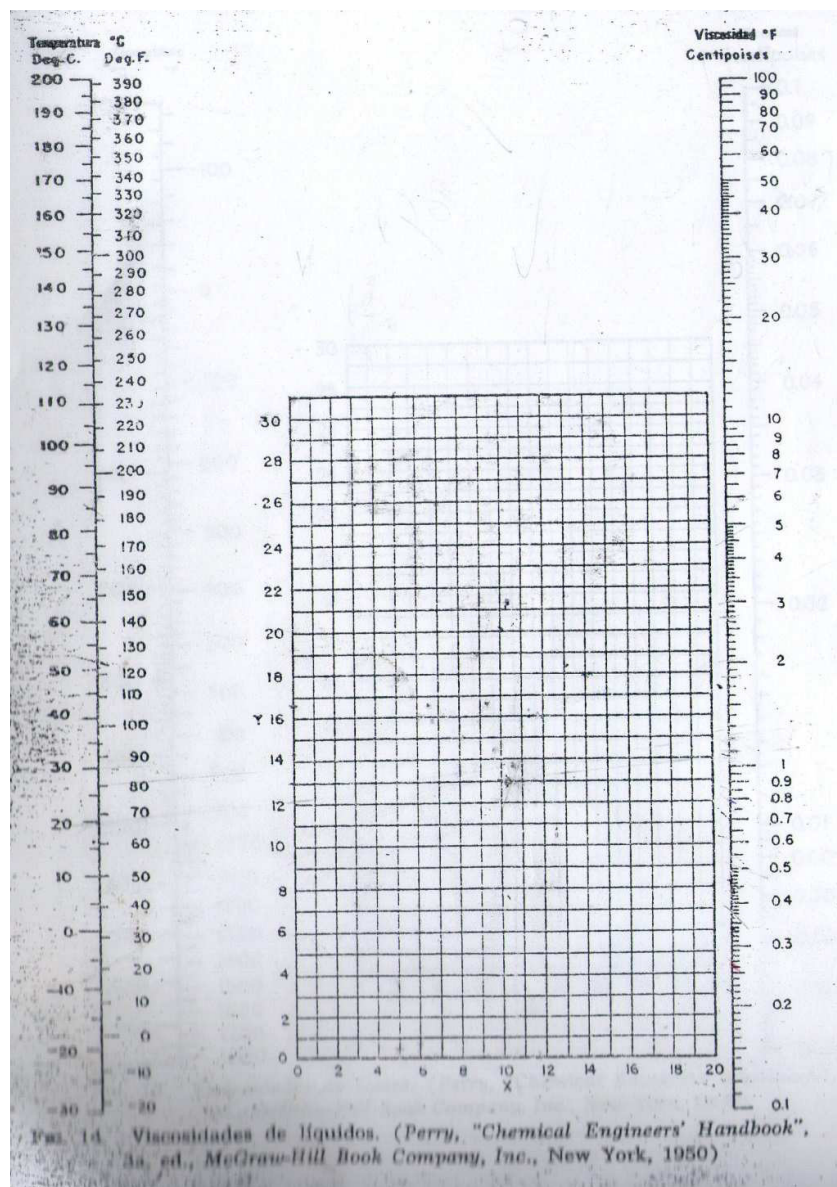
ANEXO A3

Viscosidad de líquidos – Parte 1

VISCOSIDADES DE LIQUIDOS*					
Para usarse como Coordenadas con la Fig. 14					
Líquido	X	Y	Líquido	X	Y
Acetaldehído	15.2	4.8	Cloruro Estánico	13.5	12.8
Acetato de Amilo	11.8	12.5	Cresol, meta	2.5	20.8
Acetato de Butilo	12.3	11.0	Dibromoetano	12.7	15.8
Acetato de Etilo	13.7	9.1	Dicloroetano	13.2	12.2
Acetato de Metilo	14.2	8.2	Diclorometano	14.6	8.9
Acetato de Vinilo	14.0	8.8	Difenilo	12.0	18.3
Acetona 100%	14.5	7.2	Eter Etilico	14.5	5.3
Acetona 35%	7.9	15.0	Etilbenceno	13.2	11.5
Agua	10.2	13.0	Etilenglicol	6.0	23.6
Acido Acético 100%	12.1	14.2	Fenol	6.9	20.8
Acido Acético 70%	9.5	17.0	Formiato de Etilo	14.2	8.4
Acido Butírico	12.1	15.3	Freon 11	14.4	9.0
Acido Clorosulfónico	11.2	18.1	Freon 12	16.8	5.6
Acido Fórmico	10.7	15.8	Freon 21	15.7	7.5
Acido Isobutírico	12.2	14.4	Freon 22	17.2	4.7
Acido Nítrico 95%	12.8	13.8	Freon 113	12.5	11.4
Acido Nítrico 60%	10.8	17.0	Freon 114	14.6	8.3
Acido Propiónico	12.8	13.8	Glicerina 100%	2.0	30.0
Acido Sulfúrico 110%	7.2	27.4	Glicerina 50%	6.9	19.6
Acido Sulfúrico 98%	7.0	24.8	Heptano	14.1	8.4
Acido Sulfúrico 60%	10.2	21.3	Hexano	14.7	7.0
Alcohol Alílico	10.2	14.3	Hidróxido de Sodio 50%	3.2	25.8
Alcohol Amílico	7.5	18.4	Yoduro de Etilo	14.7	10.3
Alcohol Butílico	8.6	17.2	Yoduro de Propilo	14.1	11.6
Alcohol Etilico 100%	10.5	13.8	Isobutano	14.5	3.7
Alcohol Etilico 95%	9.8	14.3	Mercurio	18.4	16.4
Alcohol Etilico 40%	6.5	16.6	Metanol 100%	12.4	10.5
Acido Clorhídrico 31.5%	13.0	16.6	Metanol 90%	12.3	11.8
Alcohol Isobutílico	7.1	18.0	Metanol 40%	7.8	15.5
Alcohol Isopropílico	8.2	16.0	Metiltilcetona	13.9	8.6
Alcohol Octílico	6.2	21.1	Naftaleno	7.9	18.1
Alcohol Propílico	9.1	16.5	Nitrobenceno	10.6	16.2
Amoniaco 100%	12.6	2.0	Nitrotolueno	11.0	17.0
Amoniaco 26%	10.1	13.9	Octano	13.7	10.0
Anhidrido Acético	12.7	12.8	Oxalato de Dietilo	11.0	16.4
Anilina	8.1	18.7	Oxalato de Dimetilo	12.3	15.8
Anisol	12.3	13.5	Oxalato de Dipropilo	10.3	17.7
Benceno	12.5	10.9	Pentacloroetano	10.9	17.3
Bióxido de Azufre	15.2	7.1	Pentano	14.9	5.2
Bióxido de Carbono	11.6	0.3	Propano	15.3	1.0
Bisulfuro de Carbono	16.1	7.5	Salmuera CaCl ₂ 25%	6.6	15.9
Bromo	14.2	13.2	Salmuera NaCl 25%	10.2	16.6
Bromotolueno	20.0	15.9	Sodio	16.4	13.9
Bromuro de Etilo	14.5	8.1	Tetracloroetano	11.9	15.7
Bromuro de Propilo	14.5	9.6	Tetracloroetileno	14.2	12.7
n-Butano	15.3	3.3	Tetracloruro de Carbono	12.7	13.1
Ciclohexanol	2.9	24.3	Tetracloruro de Titanio	14.4	12.3
Clorobenceno	12.3	12.4	Tribromuro de Fósforo	13.8	16.7
Cloroformo	14.4	10.2	Tricloruro de Arsénico	13.9	14.5
Clorotolueno, orto	13.0	13.3	Tricloruro de Fósforo	16.2	10.9
Clorotolueno, meta	13.3	12.5	Tricloroetileno	14.8	10.5
Clorotolueno, para	13.3	12.5	Tolueno	13.7	10.4
Cloruro de Etilo	14.8	6.0	Turpentina	11.5	14.9
Cloruro de Metilo	15.0	3.8	Xileno, orto	13.5	12.1
Cloruro de Propilo	14.4	7.5	Xileno, meta	13.9	12.1
Cloruro de Sulfurilo	15.2	12.4	Xileno, para	13.9	10.9

Fuente: Chemical Engineers' Handbook; Perry; 3d ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1950

Viscosidad de líquidos – Parte 2



Fuente: Chemical Engineers' Handbook; Perry; 3d ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1950

ANEXO A4

Conductividad Térmica

TABLA 4. CONDUCTIVIDADES TERMICAS DE LIQUIDOS*

$k = / (h)(pie^2)(^{\circ}F/pie)$

Puede suponerse una variación lineal con la temperatura. Los valores extremos que se dan constituyen también los límites de temperatura en los cuales se recomiendan los datos.

Líquido	$^{\circ}F$	k	Líquido	$^{\circ}F$	k
Aceites			Bromobenceno	86	0.074
Ricino	68	0.104	212	0.070	
Oliva	68	0.100	5	0.128	
Acetato de etilo	68	0.097	86	0.111	
Alcohol 100%	68	0.101	86	0.093	
80%	68	0.105	167	0.088	
60%	68	0.137	32	0.107	
40%	68	0.176	154	0.094	
20%	68	0.224	86	0.32	
100%	68	0.281	86	0.34	
Benceno	122	0.087	86	0.33	
Bromuro	86	0.086	86	0.34	
Eter	140	0.082	50	0.083	
Yoduro	86	0.070	86	0.080	
Acetato de amilo	86	0.080	86	0.078	
Alcohol (n-)	167	0.078	140	0.079	
Acetato butílico (n-)	104	0.064	86	0.085	
Alcohol (n-)	167	0.063	140	0.083	
Acetona	50	0.083	20	0.057	
Acido acético 100%	86	0.084	60	0.053	
50%	212	0.089	100	0.048	
Acido esteárico	86	0.088	140	0.043	
Acido láurico	167	0.087	180	0.038	
Acido oleico	77-86	0.085	122	0.082	
Acido palmítico	86	0.097	5	0.111	
Acido salicílico 90%	167	0.095	86	0.096	
60%	50	0.091	86	0.075	
30%	86	0.102	167	0.073	
Agua	167	0.095	32	0.153	
Alcohol alílico	68	0.099	86	0.078	
Alcohol heptílico (n-)	68	0.20	68	0.164	
Alcohol hexílico (n-)	212	0.0786	68	0.189	
Alcohol metílico 100%	212	0.102	68	0.220	
80%	212	0.0925	68	0.259	
60%	212	0.0839	68	0.278	
40%	86	0.21	212	0.164	
20%	86	0.25	86	0.081	
Cloruro	86	0.30	140	0.079	
Alcohol propílico (n-)	32	0.330	86	0.080	
Alcohol (iso-)	86	0.356	140	0.078	
Amoniaco, acuoso 30%	140	0.381	68	0.086	
Anilina	176	0.398	167	0.081	
Benzoleno	77-86	0.104	82	4.83	
Cloruro de calcio, salmuera 30%	86	0.094	86	0.095	
Cloruro de sodio, salmuera 25.0%	167	0.091	212	0.088	
Cloruro de sodio, salmuera 12.5%	86	0.093	86	0.125	
Clorobenceno	167	0.090	140	0.120	
Cloroformo	68	0.124	86	0.084	
Cymene (para)	68	0.154	140	0.082	
Decano (n-)	68	0.190	86	0.083	
Diclorodifluorometano	68	0.234	140	0.081	
Dicloroetano	68	0.284	86	0.084	
Diclorometano	122	0.114	212	0.078	
Eter de petróleo	5	0.111	86	0.078	
Etilen glicol	86	0.089	167	0.074	
Gasolina	86	0.089	122	0.092	
Glicerina 100%	167	0.095	212	49	
80%	86	0.091	410	46	
60%	140	0.090	86	0.086	
40%	5-86	0.29	167	0.084	
20%	86	0.361	122	0.077	
Heptano (n-)	140	0.39	122	0.080	
Hexano (n-)	39-68	0.100	59	0.074	
Paraldehído	86	0.099	59	0.106	
Pentano (n-)	140	0.087	68	0.090	
Percloroetileno	86	0.087	68	0.090	
Sodio	86	0.087	68	0.090	
Tolueno	86	0.087	68	0.090	
Tricloroetano	86	0.087	68	0.090	
Tricloroetileno	86	0.087	68	0.090	
Terpentina (aguarrás)	86	0.087	68	0.090	
Xileno (orto)	86	0.087	68	0.090	
Xileno (meta)	86	0.087	68	0.090	

Fuente: Chemical Engineers' Handbook; Perry; 3d ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1950

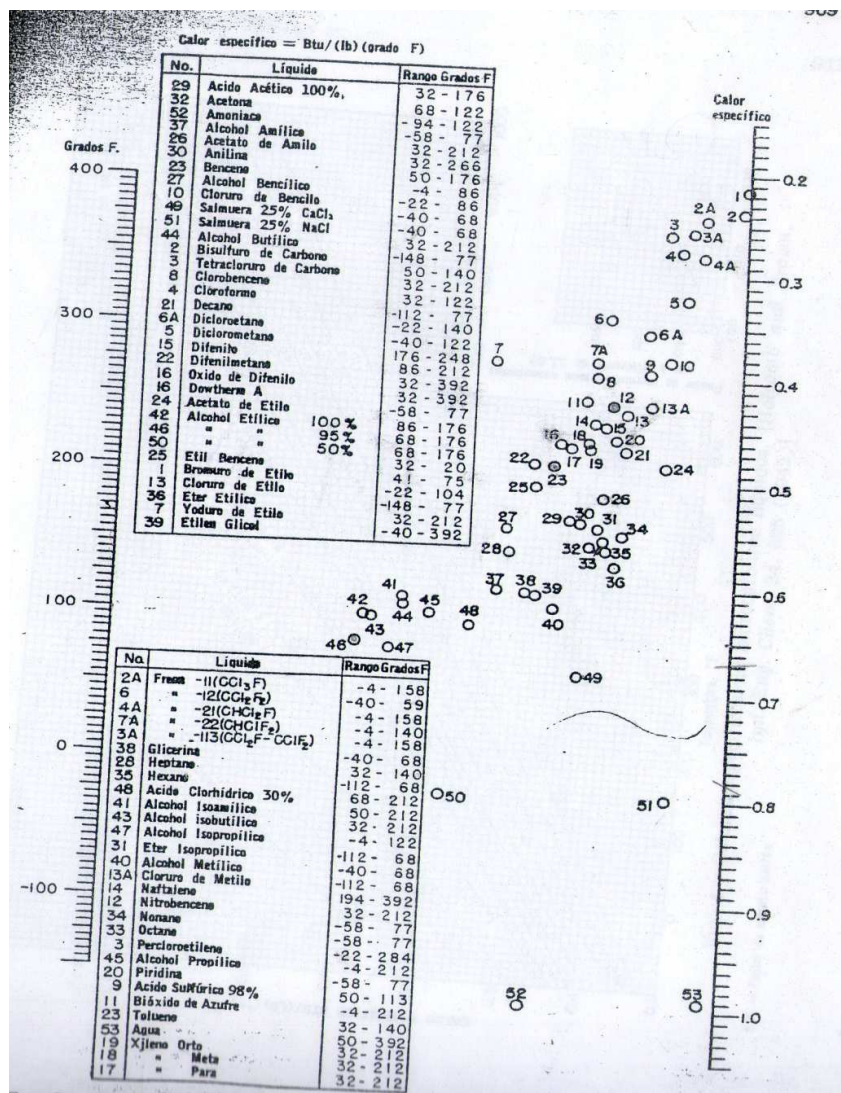
Conductividad Térmica

Sustancia	°F	k	Sustancia	°F	k
Acetato de etilo	115	0.0072	Diclorodifluorometano	32	0.0048
	212	0.0096		122	0.0064
	363	0.0141		212	0.0080
Alcohol	68	0.0089		302	0.0097
	212	0.0124	Etano	-94	0.0066
Cloruro	32	0.0055		-29	0.0086
	212	0.0095		32	0.0106
	363	0.0135		212	0.0175
Eter	413	0.0152	Etileno	-96	0.0064
	32	0.0077		32	0.0101
	115	0.0099		122	0.0131
	212	0.0131		212	0.0161
	363	0.0189	Heptano (n-)	392	0.0112
	413	0.0209		212	0.0103
Acetona	32	0.0057	Hexano (n-)	32	0.0072
	115	0.0074		68	0.0080
	212	0.0099	Hexeno	32	0.0061
	363	0.0147		212	0.0109
Acetileno	-103	0.0068	Hidrógeno	-148	0.065
	32	0.0108		-58	0.083
	122	0.0140		32	0.100
	212	0.0172		122	0.115
Aire	-148	0.0095		212	0.129
	32	0.0140		572	0.178
	212	0.0183	Hidrógeno y bióxido de carbono.	32	
	392	0.0226	0% H ₂		0.0083
	572	0.0265	20%		0.0165
Alcohol metílico	32	0.0083	40%		0.0270
	212	0.0128	60%		0.0410
Acetato	32	0.0059	80%		0.0620
	68	0.0068	100%		0.10
Amoniaco	-76	0.0095	Hidrógeno y nitrógeno	32	
	32	0.0128	0 H ₂		0.0133
	122	0.0157	20%		0.0212
	212	0.0185	40%		0.0313
	32	0.0052	60%		0.0438
Benceno	115	0.0073	80%		0.0635
	212	0.0103	Hidrógeno y óxido nítrico	32	
	363	0.0152	0% H ₂		0.0002
Bióxido de azufre	413	0.0176	20%		0.0170
	32	0.0050	40%		0.0270
Bióxido de carbono	212	0.0069	60%		0.0410
	-58	0.0068	80%		0.0650
	32	0.0085	Mercurio	392	0.0197
	212	0.0133	Metano	-148	0.0100
	392	0.0228		-58	0.0145
Bisulfuro	572	0.0248		32	0.0175
	32	0.0040		122	0.0215
Monóxido	45	0.0042	Nitrógeno	-148	0.0095
	-312	0.0041		32	0.0140
	-294	0.0046		122	0.0160
	32	0.0135		212	0.0180
Tetracloruro	115	0.0041	Oxido nítrico	-94	0.0103
	212	0.0052		32	0.0138
Butano (n-)	363	0.0065	Oxido nítrico	-96	0.0067
	32	0.0078		32	0.0087
Butano (iso-)	212	0.0135	Oxígeno	212	0.0128
	32	0.0080		-148	0.0085
	212	0.0139		-58	0.0119
Ciclohexano	216	0.0095		32	0.0142
Cloro	32	0.0043		122	0.0164
Cloroformo	32	0.0038		212	0.0185
	115	0.0046	Pentano (n-)	32	0.0074
	212	0.0058	(iso-)	68	0.0083
	363	0.0077		32	0.0072
Cloruro de metileno	32	0.0039	Propano	212	0.0127
	115	0.0049		32	0.0087
	212	0.0063	Sulfuro de hidrógeno	212	0.0151
	413	0.0095	Vapor de agua	32	0.0076
Cloruro de metilo	32	0.0053		115	0.0120
	115	0.0072		212	0.0137
	212	0.0094		392	0.0187
	363	0.0130		572	0.0248
	413	0.0148		752	0.0315
				932	0.0441

Fuente: Chemical Engineers' Handbook; Perry; 3d ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1950

ANEXO A5

Calor Específico



Fuente: Chemical Engineers' Handbook; Perry; 3d ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1950

ANEXO A6

Coeficiente Total para Diseño

TABLA 8. VALORES APROXIMADOS DE LOS COEFICIENTES TOTALES PARA DISEÑO. LOS VALORES INCLUYEN UN FACTOR DE OBSTRUCCION TOTAL DE 0.003 Y CAIDA DE PRESION PERMISIBLE DE 5 A 10 LB/PLG² EN LA CORRIENTE QUE CONTROLE

Enfriadores		
Fluido caliente	Fluido frío	U_D total
Agua	Agua	250-500 *
Metanol	Agua	250-500 *
Amoniacó	Agua	250-500 *
Soluciones acuosas	Agua	250-500 *
Sustancias orgánicas ligeras ¹	Agua	75-150
Sustancias orgánicas medias ²	Agua	50-125
Sustancias orgánicas pesadas ³	Agua	5- 75
Gases	Agua	2- 50
Agua	Salmuera	100-200
Sustancias orgánicas ligeras	Salmuera	40-100
Calentadores		
Fluido caliente	Fluido frío	U_D total
Vapor de agua	Agua	200-700 *
Vapor de agua	Metanol	200-700 *
Vapor de agua	Amoniacó	200-700 *
Vapor de agua	Soluciones acuosas:	
Vapor de agua	menos de 2.0 cp	200-700
Vapor de agua	Más de 2.0 cp	100-500 *
Vapor de agua	Sustancias orgánicas ligeras	50-100
Vapor de agua	Sustancias orgánicas medias	100-200
Vapor de agua	Sustancias orgánicas pesadas	6-60
Vapor de agua	Gases	5-50 *
Intercambiadores		
Fluido caliente	Fluido frío	U_D total
Agua	Agua	250-500 *
Soluciones acuosas	Soluciones acuosas	250-500 *
Sustancias orgánicas ligeras	Sustancias orgánicas ligeras	40-75
Sustancias orgánicas medias	Sustancias orgánicas medias	20-60
Sustancias orgánicas pesadas	Sustancias orgánicas pesadas	10-40
Sustancias orgánicas pesadas	Sustancias orgánicas ligeras	30-60
Sustancias orgánicas ligeras	Sustancias orgánicas pesadas	10-40

Fuente: Chemical Engineers' Handbook; Perry; 3d ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1950

ANEXO A7

Propiedades de Dimensiones para Tubería de Acero

A P E N D I C E

949

TABLA 11. DIMENSIONES DE TUBERIA DE ACERO (IPS)

Tamaño nominal del tubo, IPS plg	DE, plg	Cédula No.	DI, plg	Área de flujo por tubo, plg ²	Superficie por pie lineal, pies ² /pie		Peso por pie lineal, lb de acero
					Exterior	Interior	
1/8	0.405	40* 80†	0.269 0.215	0.058 0.036	0.106	0.070 0.056	0.25 0.32
1/4	0.540	40* 80†	0.364 0.302	0.104 0.072	0.141	0.095 0.079	0.43 0.54
3/8	0.675	40* 80†	0.493 0.423	0.192 0.141	0.177	0.129 0.111	0.57 0.74
1/2	0.840	40* 80†	0.622 0.546	0.304 0.235	0.220	0.163 0.143	0.85 1.09
3/4	1.05	40* 80†	0.824 0.742	0.534 0.432	0.275	0.216 0.194	1.13 1.43
1	1.32	40* 80†	1.049 0.957	0.864 0.718	0.344	0.274 0.250	1.68 2.17
1 1/4	1.66	40* 80†	1.380 1.278	1.50 1.28	0.435	0.362 0.335	2.28 3.00
1 1/2	1.90	40* 80†	1.610 1.500	2.04 1.76	0.498	0.422 0.393	2.72 3.64
2	2.38	40* 80†	2.067 1.939	3.35 2.95	0.622	0.542 0.508	3.66 5.03
2 1/2	2.88	40* 80†	2.469 2.323	4.79 4.23	0.753	0.647 0.609	5.80 7.67
3	3.50	40* 80†	3.068 2.900	7.38 6.61	0.917	0.804 0.760	7.58 10.3
4	4.50	40* 80†	4.026 3.826	12.7 11.5	1.178	1.055 1.002	10.8 15.9
6	6.625	40* 80†	6.065 5.761	28.9 26.1	1.734	1.590 1.510	19.0 28.6
8	8.625	40* 80†	7.981 7.625	50.0 45.7	2.258	2.090 2.000	28.6 43.4
10	10.75	40* 60	10.02 9.75	78.8 74.6	2.814	2.62 2.55	40.5 54.8
12	12.75	30	12.09	115	3.338	3.17	43.8
14	14.0	30	13.25	138	3.665	3.47	54.6
16	16.0	30	15.25	183	4.189	4.00	62.6
18	18.0	20†	17.25	234	4.712	4.52	72.7
20	20.0	20	19.25	291	5.236	5.05	78.6
22	22.0	20†	21.25	355	5.747	5.56	84.0
24	24.0	20	23.25	425	6.283	6.09	94.7

* Comúnmente conocido como estándar

Fuente: Chemical Engineers' Handbook; Perry; 3d ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1950

ANEXO A8

Precios Unitarios de Accesorios y Materiales Usados en la Construcción

Cantidad	Accesorio	PVP	Precio Total
1	Abrazadera A.Inox 10-22x12mm, 7mm	\$ 0,56	\$ 0,56
7	Abrazadera A.Inox 6-16x8mm	\$ 0,39	\$ 2,73
2	Acero Inox 3/8 x 45	\$ 3,02	\$ 6,03
3	Acople P/Tanque 1/2 PVC	\$ 3,20	\$ 9,60
1	Acople tanque ¾	\$ 5,50	\$ 5,50
2	Adaptador 1/2 a ½	\$ 3,92	\$ 7,84
1	Amarracable 15cm blanca 100 Uni	\$ 2,24	\$ 2,24
1	Angulo 1 1/2x1/8	\$ 12,31	\$ 12,31
4	Angulo 2x1/8	\$ 15,40	\$ 61,59
30	Anillo Plano Inox 5/16	\$ 0,07	\$ 2,02
19	Anillo Plano Inox.304 ¼	\$ 0,05	\$ 0,86
1	Anillo planos	\$ 0,08	\$ 0,08
30	Anillo Presion Inox 5/16	\$ 0,05	\$ 1,38
19	Anillo Presion Inox.304 ¼	\$ 0,05	\$ 0,96
4	Anillo Presion Inox.304 5/16	\$ 0,05	\$ 0,19
1	Balde	\$ 1,85	\$ 1,85
1	Balde con Dispensador	\$ 3,21	\$ 3,21
1	Banco de tanque soldado	\$ 4,98	\$ 4,98
1	Barril	\$ 5,25	\$ 5,25
1	Base adhesivo 25x25 mm blanco	\$ 5,62	\$ 5,62

1	Botella de Cristal	\$ 6,52	\$ 6,52
1	Breaker	\$ 11,69	\$ 11,69
1	Breaker 1P, riel, SCHNEIDER 10A	\$ 5,34	\$ 5,34
1	Broca Cobalto 1/8 Truper	\$ 0,92	\$ 0,92
4	Broca HSS 3/16" Truper	\$ 1,52	\$ 6,08
2	Bush Inox 1 x 1/2"	\$ 1,68	\$ 3,36
1	Bushing 1/2 a 1/4	\$ 0,92	\$ 0,92
3	Bushing 1/2 x 3/8 Acero Inox	\$ 3,00	\$ 9,00
1	Bushing 1/8 x 1/2 Bronce	\$ 3,65	\$ 3,65
12	Cable de red UTP Nivel	\$ 0,55	\$ 6,60
1	Cable negro/ rojo, espadines, estano	\$ 5,26	\$ 5,26
1	Caja, pintada para eléctricos	\$ 50,00	\$ 50,00
1	Camco 6000W 240V Screw-In Foldback	\$ 29,02	\$ 29,02
1	Canaletas plasticas 25 x 25mm 2mts	\$ 4,87	\$ 4,87
1	Canalete plastico ranurada	\$ 4,40	\$ 4,40
5	Cauchos para sensores	\$ 1,50	\$ 7,50
1	Cinta adhesiva aluminio 2"x50yds	\$ 6,31	\$ 6,31
1	Cinta doble faz trabajo/ pesado	\$ 4,47	\$ 4,47
10	Cinta Teflon	\$ 0,35	\$ 3,47
2	Cinta teflon 1/2"x10mt Plastigama	\$ 0,32	\$ 0,64
3	Codo 1/2 x 90 PVC	\$ 0,50	\$ 1,50
1	Codo 1/2x90g	\$ 0,58	\$ 0,58
2	Codo 3/8"	\$ 0,80	\$ 1,60
1	Codo cach	\$ 1,25	\$ 1,25

6	Codo cobre 1/2" x 90	\$ 0,48	\$ 2,88
2	Codo Inox 1/2" x 90" rosc	\$ 1,26	\$ 2,52
1	Codo Inox. 316 150 - 1/2"x90	\$ 1,56	\$ 1,56
2	Codo poliprop rosc. 1/2"x90	\$ 0,43	\$ 0,86
2	Codo Rosc.90x1/2"	\$ 1,14	\$ 2,28
3	Codos Inox 1/2 x 45	\$ 2,16	\$ 6,48
1	Condensador	\$ 60,00	\$ 60,00
3	Conector 1/8 x 1/8 Bronc	\$ 2,45	\$ 7,35
8	Conector P/Cable de red	\$ 0,39	\$ 3,12
1	Corcho 30x3	\$ 1,58	\$ 1,58
1	Corte 1/4-3/8	\$ 0,22	\$ 0,22
1	Corte botella vidrio	\$ 8,96	\$ 8,96
1	Cruz Acero Inox 1/2"	\$ 3,90	\$ 3,90
1	Detergente Deja Multiaccion	\$ 0,92	\$ 0,92
2	Disco corte acero Inox Bosch	\$ 2,83	\$ 5,66
1	Enchufe	\$ 0,90	\$ 0,90
1	Estructura Soldada	\$ 20,00	\$ 20,00
1	Foco 100 Watts	\$ 1,25	\$ 1,25
1	Galón Alcohol industrial	\$ 8,50	\$ 8,50
1	Grata 1/4"x2" Trupper hilo fino	\$ 1,65	\$ 1,65
2	Inox Codo Rosca 1/2" x 90	\$ 1,92	\$ 3,83
1	Lana/Vid. Plancha Owen USA 1.20mts x 1.5"	\$ 3,25	\$ 3,25
4	LED verde y rojo	\$ 0,24	\$ 0,96

2	Lija Agua	\$ 0,50	\$ 1,01
2	Lija Metal	\$ 0,65	\$ 1,30
2	litro de diluyente	\$ 1,75	\$ 3,50
1	Litro de Pintura Esmalte Brillante	\$ 4,50	\$ 4,50
1	Llave esférica ½	\$ 2,80	\$ 2,80
1	Llave esférica ¾	\$ 4,50	\$ 4,50
5	Lt. Alcohol Industrial	\$ 5,00	\$ 25,00
17	Manguera Vinyl	\$ 1,62	\$ 27,54
1	Masilla Epoxi Rally 100gr	\$ 2,33	\$ 2,33
1	Masilla Plástica P/Auto 1/4 Must	\$ 7,90	\$ 7,90
1	Medidor de Nivel de Agua	\$ 22,96	\$ 22,96
4	metros cable	\$ 0,19	\$ 0,76
2	Metros cañería de cobre 1/8	\$ 1,90	\$ 3,80
1	MFD Tantalio	\$ 0,88	\$ 0,88
2	mt cable 2x16	\$ 0,70	\$ 1,40
2	mts cable sucre 2x10	\$ 1,99	\$ 3,98
2	mts cable sucre 2x14	\$ 1,11	\$ 2,22
2	Neplo	\$ 0,36	\$ 0,72
1	Neplo 1/2 * 6cm	\$ 0,24	\$ 0,24
1	Neplo 1/4"	\$ 0,99	\$ 0,99
1	Neplo 3/4 * 10cm	\$ 0,37	\$ 0,37
1	Neplo 3/8 x 3"	\$ 1,00	\$ 1,00
1	Neplo 3/8 x 3" Acero Inox	\$ 6,25	\$ 6,25
1	neplo inox 1/2 x 16.5 cm	\$ 7,90	\$ 7,90

1	neplo inox 1/2 x 20 cm	\$ 6,80	\$ 6,80
1	Neplo Inox 1/2 x 3"	\$ 5,33	\$ 5,33
1	neplo inox 1/2 x 35.5 cm	\$ 16,75	\$ 16,75
1	Neplo Inox 1/2 x 5	\$ 2,36	\$ 2,36
4	Neplo inox 1/2" x 1 1/2"	\$ 1,27	\$ 5,08
1	Neplo inox 1/2" x 10"	\$ 5,38	\$ 5,38
2	Neplo Inox 1/2" x 3"	\$ 2,13	\$ 4,27
1	Neplo Inox 1/2" x 6"	\$ 2,60	\$ 2,60
1	Neplo Inox 150 - 3/8	\$ 2,31	\$ 2,31
1	Neplo Inox 3/8	\$ 4,84	\$ 4,84
1	Neplo Inox 3/8 x 2"	\$ 1,44	\$ 1,44
1	Neplo inox 3/8 x 3"	\$ 3,30	\$ 3,30
1	Neplo Inox 3/8 x 4"	\$ 5,71	\$ 5,71
1	Neplo Inox 3/8 x 5	\$ 2,14	\$ 2,14
2	Neplo Inox 3/8 x 5"	\$ 6,10	\$ 12,21
1	Neplo Inox 3/8" perdido x 1"	\$ 1,01	\$ 1,01
1	Neplo inox 3/8" x 6"	\$ 2,21	\$ 2,21
1	Neplo Inox c40 1/2" x 5	\$ 2,36	\$ 2,36
1	Neplo Inox. C40 1/2" perdido x 1.1/8"	\$ 1,15	\$ 1,15
1	Neplo Inox. C40 1/2" perdido x 1.1/8"	\$ 1,15	\$ 1,15
1	Neplo inox. C40 1/2" x 1 1/2"	\$ 1,27	\$ 1,27
1	Neplo Inox. C40 1/2" x 8"	\$ 3,28	\$ 3,28
1	Neplo Inox. C40 1/2" x 8"	\$ 3,28	\$ 3,28
1	Neplo Inox. C40 1/2"x90	\$ 2,60	\$ 2,60

1	Neplo PP ½	\$ 0,32	\$ 0,32
2	Nudo 1/2 plastigama	\$ 1,25	\$ 2,50
1	Nudo 3/4 plastigama	\$ 2,30	\$ 2,30
1	Nudo 3/8 Acero Inox	\$ 4,40	\$ 4,40
2	Nudo Inox.304 1/2"	\$ 2,62	\$ 5,24
1	Ojo de cangrejo	\$ 3,92	\$ 3,92
2	Perforacion – Torno	\$ 4,00	\$ 8,00
2	Permatex	\$ 1,96	\$ 3,92
30	Perno Inox 5/16 - 18x1	\$ 0,22	\$ 6,72
2	Perno Inox.304 1/4 - 20 x 1 ½	\$ 0,16	\$ 0,32
6	Perno Inox.304 1/4 - 20 x ¾	\$ 0,10	\$ 0,60
3	Perno Inox.304 1/4-20x1	\$ 0,12	\$ 0,37
4	Perno Inox.304 5/16 - 18x1	\$ 0,22	\$ 0,90
40	Pulgadas V.Roscada Inox.304 1/4-20	\$ 0,15	\$ 5,82
2	Red. Inox 1" x 1/2"	\$ 1,92	\$ 3,83
3	Reduccion 1/2" a 3/8"	\$ 0,50	\$ 1,50
2	Reductor	\$ 1,22	\$ 2,44
1	Resistencia Tubular 6000W - 240V	\$ 60,00	\$ 60,00
1	Rodela de presion 3/16	\$ 0,27	\$ 0,27
3	Sierra Sanflex	\$ 2,46	\$ 7,37
1	Soldadura Aga	\$ 6,00	\$ 6,00
5	Soldadura Indura 1/8 Libra	\$ 1,61	\$ 8,04
1	Switch	\$ 0,50	\$ 0,50
2	Tacho elegante	\$ 4,91	\$ 9,82

1	Taípe electri truper negro 18 mts	\$ 0,95	\$ 0,95
1	Tap hembra inox. 304 CI 150 - 1/2"	\$ 0,94	\$ 0,94
1	Tap hembra inox. 316 CI 150-3/8"	\$ 0,83	\$ 0,83
1	Tapon Polipr. 1/2"	\$ 0,38	\$ 0,38
1	Tee	\$ 0,55	\$ 0,55
1	Tee ½	\$ 3,50	\$ 3,50
1	Tee 1/2 PVC	\$ 0,75	\$ 0,75
1	Tee 1/2"	\$ 1,71	\$ 1,71
1	Tee inox. 1/2"	\$ 2,00	\$ 2,00
1	Tee rh pp	\$ 1,89	\$ 1,89
1	Toma sencillo americano 2P	\$ 1,76	\$ 1,76
4	Tornillo para tiradera	\$ 0,02	\$ 0,08
12	Tornillos 5 x 15mm c/red, c/tuerca Galv	\$ 0,04	\$ 0,54
12	Tornillos 6 x 1/2" T/Pato C/Red. Niquelado	\$ 0,01	\$ 0,13
4	Tornillos 8x1/2" T/Pato Niquelado	\$ 0,02	\$ 0,09
1	Transporte de ángulos a ESPOL	\$ 8,00	\$ 8,00
10	Tubo Flexible ½	\$ 1,95	\$ 19,49
30	Tuerca Inox 5/16 – 18	\$ 0,08	\$ 2,42
19	Tuerca Inox.304 1/4 – 20	\$ 0,06	\$ 1,06
4	Tuerca Inox.304 5/16-18	\$ 0,08	\$ 0,32
1	Union	\$ 0,49	\$ 0,49
1	Union 3/8"	\$ 2,00	\$ 2,00
1	Union Flex 1/2"	\$ 0,15	\$ 0,15

1	Union inox. 304 CI 150-3/4"	\$ 1,47	\$ 1,47
2	Union Inox. 316 CI 150 - 1/2"	\$ 1,34	\$ 2,69
2	Union Inox.304 1/2"	\$ 1,16	\$ 2,32
1	Union PP ½	\$ 0,46	\$ 0,46
2	Union Red	\$ 1,10	\$ 2,20
1	Universal Poliprop 1/2"	\$ 1,02	\$ 1,02
1	Val/Bola Apollo 70 3/8"	\$ 21,02	\$ 21,02
1	Valvula Bronce ½	\$ 6,50	\$ 6,50
1	Valvula Check 1/2" Red-White Japan	\$ 15,49	\$ 15,49
1	Valvula Cheque Roma ITAP 104 1/2"	\$ 10,19	\$ 10,19
1	Valvula Palanca 1/8 Acero Inox	\$ 10,95	\$ 10,95
1	Valvula Palanca 3/8 Acero Inox	\$ 12,50	\$ 12,50
1	Visor Acrilico	\$ 40,00	\$ 40,00
1	Waipe	\$ 3,89	\$ 3,89
	TOTAL		\$ 1.016,89

Fuente: Barcia A., León N.

ANEXO A9

Especificaciones de Termocuplas

Description

Specification:

- Stainless steel sheath and waterproof
- Measurement range: -20 to 105 °C
- Length of wire: 1 meter
- Size of probe: 5 x 25 mm
- Output: 2 wires
- Type: NTC 10k $\pm$ 1% 3950
- measure environmental temperatures using arduino ADC and this 10k NTC LINK
- Resistance to temperature conversion table LINK
- B-constant : 3380K $\pm$ 1%
- Typical Dissipation Constant 5mW/ °C
- Probe insulation: >100M Ω m
- Peak Voltage sustain time: 2 seconds, AC1800V 1mA 2 seconds
- Stress sustain: 9.8N (1kgF) for 1 minute no deformation

Package Included:

- 2 x NTC 10K 1% Temperature Temp Sensor Probe Thermometer Waterproof cable

ANEXO A10

Guía Operativa

ESPOL	OPERACIÓN DE LA UNIDAD DE DESTILACIÓN						
	LAB. LOPU		FECHA DE EMISIÓN:	DD/MM/AA	CÓDIGO: 1		
	ELABORADO POR:	BARCIA - LEÓN	APROBADO POR:				
	OPERADO POR:	ALUMNOS CON SUPERVISIÓN DEL PROFESOR					
1. OBJETIVO							
Este manual señala el equipo de protección personal necesario y los pasos a seguir por el personal en el proceso de Operación de la Unidad de Destilación.							
2. EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL Y UNIFORME							
	2.1 Mascarilla		2.2 Botas punta de acero		2.3 Gafas		2.4 Guantes resistentes al calor
				2.5 Mandil			

3. NOTAS AL OPERARIO			
Como paso previo a la operación de la Unidad de Destilación, el operario debe verificar los siguientes puntos:			
3.1 Las válvulas V-101, V-102, V-103, V-104 , V-105 deben estar CERRADAS y únicamente la válvula V-106 debe estar ABIERTA.			
3.2 La llave del líquido refrigerante del condensador debe estar abierta.			
Una vez culminada la destilación, es importante que el operario deje la unidad de destilación bajo las siguientes condiciones:			
3.3 Los breakers dentro de la caja y el general se encuentren apagados.			
3.4 La llave del líquido refrigerante del condensador quede cerrada.			
3.4 Las válvulas V-101, V-102, V-103, V-104 , V-105, V-106 deben estar CERRADAS			
3.5 Los tanques TK-101 y TK-102 queden cerrados.			
4. PROCEDIMIENTO			
	4.1 Preparar la mezcla de alimentación y verificar que se encuentre a 20° Gay-Lussac. (13 Ltros Agua + 3 Ltros Alcohol Industrial)		4.2 Subir el breaker general de la Unidad de Destilación.
	4.3 Abrir la válvula de paso V-101 que se encuentra entre el recipiente TK-101 y la bomba.		4.4 Encender el breaker de la bomba y de la resistencia.

	4.4 Encender el switch de la bomba y apagarlo cuando toda la mezcla se encuentre en TK - 102.		4.5 Encender el switch de la pantalla y oprimir cualquier tecla para avanzar.
	4.6 Elegir el sensor en el cual se desea controlar la temperatura, presionando un número en el teclado alfanumérico. (1,2 o 3)		4.6 Abrir la válvula V102 y esperar a que el símbolo [!] desaparezca de la pantalla.
4. PROCEDIMIENTO			
	4.7 Escribir en el teclado la temperatura de operación (79°C) y presionar #.		4.8 Una vez que caiga la primera gota de condensado (15 min. Aprox) cerrar la válvula V-106.

	4.9 Esperar a que el visor se encuentre lleno en sus 3/4 partes (22,5 ml) y abrir SIMULTÁNEAMENTE las válvulas V-105 y V-106.		4.10 Esperar hasta que caiga la última gota de destilado en el recipiente TK-103 y medir sus grados de alcohol.
		4.11 Mantener presionada la tecla # de la pantalla, para terminar con la operación.	

Fuente: Barcia A., León N.

ANEXO B

ANEXO B1

Figuras de Construcción y Puesta en Marcha de la Columna de Destilación

I)



Fuente: Barcia A., León N.

II)



Fuente: Barcia A., León N.

III)



Fuente: Barcia A., León N.

IV)



Fuente: Barcia A., León N.

v)



Fuente: Barcia A., León N.

vi)



Fuente: Barcia A., León N.

VII)



Fuente: Barcia A., León N.

VIII)



Fuente: Barcia A., León N.

IX)



Fuente: Barcia A., León N.

X)



Fuente: Barcia A., León N.

ANEXO B2

Figuras de Parte Electrónica y Eléctrica del Sistema

I)



Fuente: Barcia A., León N.

II)



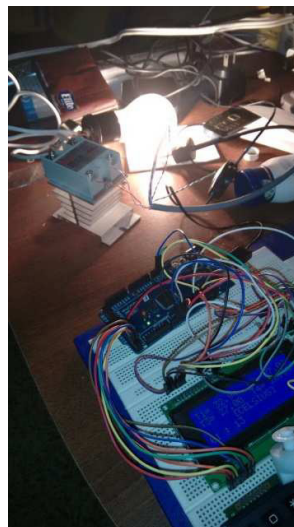
Fuente: Barcia A., León N.

III)



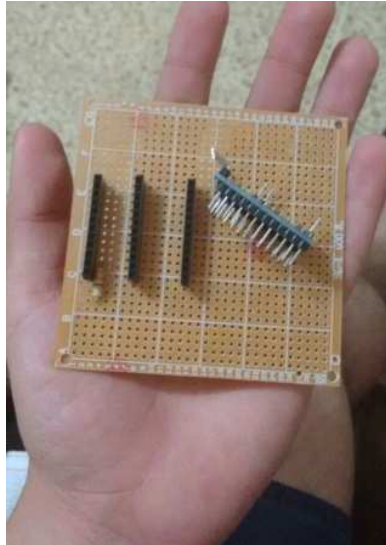
Fuente: Barcia A., León N.

IV)



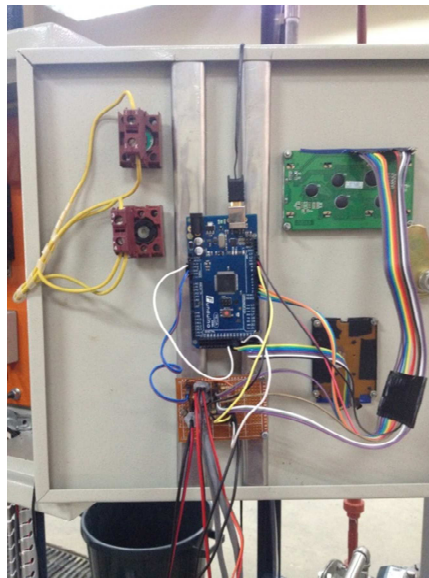
Fuente: Barcia A., León N.

v)



Fuente: Barcia A., León N.

VI)



Fuente: Barcia A., León N.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Warren, L. McCabe, Julian, C. Smith, Peter Harriot. (2007). Operaciones Unitarias en Ingeniería Química, Séptima Edición.

[2] Solsona, N., Izquierdo, M., & De Jong, O. Exploring the development of students conceptual profiles of chemical change. International Journal of Science Education, 25(1), 3-12. (2003)

[3] S. Rodríguez-Pérez, C. Arnáiz, Conectando la teoría con la práctica en asignaturas de Ingeniería Química, Form. Univ. Vol.7 No.1, 2014

[4] Banco Central del Ecuador, Comercio Exterior, Importaciones. Fecha de consulta: 12 de Enero de 2015. URL: http://www.portal.bce.fin.ec/vto_bueno/seguridad/ComercioExteriorEst.jsp

[5] Universidad de Santander, Tipo de investigación, Marco Metodológico. Fecha de consulta: 7 de Enero de 2015. URL: <https://sites.google.com/site/reciclarteudes/marco-metodolgico>

[6] Hoja de seguridad XII Etanol, UNAM. Fecha de consulta: 26 de Enero de 2015. URL: <http://www.quimica.unam.mx/IMG/pdf/12etanol.pdf>

[7] Ángeles Méndez (2013) La Guía Química, Azeótropo. Fecha de consulta: 1 de Febrero de 2015. URL: <http://quimica.laguia2000.com/quimica-inorganica/azeotropo>

[8] Destilación, azótropos y columna de fraccionamiento, Destilación azeotrópica. Fecha de consulta: 8 de Enero de 2015. URL: <http://fqb-unav.forosactivos.net/t78-destilacion-azeotropos-y-columnas-de-fraccionamiento>

[9] Universidad del Valle de México Coyoacán, Desviaciones de la Ley de Raoult, Azeotropos. Fecha de consulta: 8 de Enero de 2015. URL: <http://apuntescientificos.org>

[10] Universidad de San Buenaventura, Tipos de platos para torres de rectificación. Fecha de consulta: 26 de Enero de 2015. URL: <https://es.scribd.com/doc/241603109/Tipos-de-Platos-Para-Torres-de-Rectificacion>

[11] Universidad Nacional del Callao, Balance de material y energía, Columna de Destilación. Fecha de consulta: 26 de Enero de 2015. URL: <http://galeon.com/jackzavaleta/balw1.pdf>

[12] Francy Alvarado (2013) Duarte Determinación de la altura equivalente a un plato teórico, Altura equivalente a un plato teórico. Fecha de consulta: 8 de Febrero de 2015. URL: <http://www.scribd.com/doc/147737577/Determinacion-de-la-Altura-Equivalente-a-un-Plato-Teorico#scribd>

[13] Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Comparación entre columna de platos y columnas rellenas. Fecha de consulta: 1 de Febrero de 2015. URL: http://www.ing.unlp.edu.ar/dquimica/paginas/catedras/iofq813/archivos/Comparacion_Platos_Rellenos_101108_V0.pdf

[14] Robert E. Treybal. Segunda Edición. Operaciones de transferencia de masa.

[15] John Metcalfe Coulson, J. F. Richardson, J.R. Backhurst. Ingeniería Química. Unidades Básicas, Operaciones Unitarias.

[16] Francisco Espínola (2005) Aplicación de método de McCabe-Thiele a la rectificación de mezclas binarias, Universidad de Jaén. Fecha de consulta: 7 de Enero de 2015. URL: <http://www4.ujaen.es/~fespino/Proyecto/unidad2/unidad2.htm>

[17] Principio de la conservación de la energía. Fecha de consulta 1 de Febrero de 2015. URL: http://newton.cnice.mec.es/materiales_didacticos/energia/conservacion.htm

[18] Donald Q. Kern. (1999). Procesos de transferencia de calor, Trigésima primera reimpresión.

[19] Daniel Antonio Chuquín Vasco. *Diseño y simulación de una columna de destilación binaria de etanol – agua para la empresa Hetween*, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

[20] Simulación de procesos, Introducción Hysys. Fecha de consulta: 8 de Febrero de 2015. URL: <https://simulacionprocesos.wikispaces.com/introducci%C3%B3n+Hysys>

[21] Manuel Alberto Coronel Feijo, Diego Fernando Mesías Romo. *Construcción de un portotipo de Destilador Simple a nivel de Planta Piloto y determinación de su eficiencia*, Universidad Tecnológica Equinoccial