



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Departamento de Ciencias Químicas y Ambientales

“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UNA UNIDAD DE DESHIDRATACIÓN DE ETANOL EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS-ESPOL”.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO QUÍMICO.

PRESENTADO POR:

SOLANGE SIMUY PACTONG TOBAR

DAVID MARCELO SALINAS LOOR

GUAYAQUIL-ECUADOR.

2016

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS

INGENIERÍA QUÍMICA

INFORME DEL PROFESOR DE LA MATERIA INTEGRADORA

Habiendo sido nombrado PROFESOR DE LA MATERIA INTEGRADORA de los
Señores:

DAVID MARCELO SALINAS LOOR

SOLANGE SIMUY PACTONG TOBAR

Con el tema del proyecto integrador *“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UNA UNIDAD DE DESHIDRATACIÓN DE ETANOL EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS-ESPOL”*, previa a la obtención del título de **INGENIERO QUÍMICO**, me permito informar que he leído el contenido y he revisado el formato del proyecto integrador, luego de lo cual indico que estoy de acuerdo en que el mismo se lo ha desarrollado conforme a los lineamientos de la Unidad de Titulación Especial de la ESPOL.

Guayaquil, 17 de octubre del 2016

PABLO VICENTE TEJADA HINOJOSA.
PROFESOR DE LA MATERIA INTEGRADORA

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primeramente a Dios por habernos guiado e iluminado en este largo camino universitario.

A nuestra familia por mostrar su apoyo y preocupación por nosotros a cada momento.

Al Ingeniero Christian Macías por ayudarnos con su mano de obra al momento de construir, por su conocimiento brindado y su predisposición a apoyarnos en la búsqueda de materiales.

Al Ingeniero Danny Granizo por parte de la Papelera Nacional y al Ingeniero Wilfrido Quiñonez de la industria Soderal por ayudarnos y orientarnos tanto en equipos y materiales que nos fueron útiles para llevar a cabo el proyecto.

Al Ingeniero Pablo Tejada Director de tesis, por su apoyo y ayuda a desarrollar la idea del proyecto.

Al Ingeniero Carlos Balladares por sus recomendaciones al momento de la construcción del equipo que nos fueron muy útiles. A los Señores Arturo Palacios y Juan Vallejo por su sacrificio y ayuda en la montada del equipo.

DEDICATORIA

El proyecto va a dedicado para nuestras familias, que estuvieron apoyándonos a cada momento, guiándonos en este largo camino.

A nuestros amigos que mostraron su interés y preocupación por nuestro desarrollo del proyecto.

A nuestros profesores que durante sus enseñanzas siempre buscaron que demos lo mejor de nosotros en nuestra vida estudiantil para que luego seamos excelentes profesionales.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN.

PhD. Carlos Balladares

Vocal Principal

MBA. Pablo Tejada

Director de tesis.

Mgs. Michael Rendón

Vocal principal

DECLARACIÓN EXPRESA.

“La responsabilidad del contenido de este proyecto nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

Reglamento de graduación de la ESPOL.

Solange S. Pactong Tobar.

David M. Salinas Loor.

RESUMEN

El proyecto que se muestra a continuación incluye el diseño, construcción e instalación de una unidad de deshidratación de etanol, para obtener dicho compuesto a una concentración mayor al punto azeotrópico de la mezcla con agua, basándonos en la operación unitaria conocida como Adsorción.

El diseño de dicha unidad se pudo realizar por medio de diferentes cálculos, que abarcan conocimientos de transferencia de calor, para el diseño de los intercambiadores, así como también, hicimos uso de ecuaciones relacionadas con el fenómeno de adsorción para el diseño del tamiz molecular.

Tomando en cuenta todos los parámetros del diseño, procedimos a realizar la construcción de la unidad, para lo cual se consideró que vamos a manejar altas temperaturas y se seleccionó los materiales adecuados para ello.

Una vez construida la unidad deshidratadora se realizaron diferentes pruebas para así comprobar nuestra hipótesis y también poder definir las condiciones de operación óptimas del proceso de deshidratación de etanol. Además, se procedió a realizar un manual, con el fin de que los estudiantes que vayan a utilizar nuestro equipo lo hagan de la mejor manera.

Contenido

INFORME DEL PROFESOR DE LA MATERIA INTEGRADORA.....	2
AGRADECIMIENTOS	3
DEDICATORIA.....	4
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN.	5
DECLARACIÓN EXPRESA.	6
RESUMEN	7
ÍNDICE DE TABLAS	14
SIMBOLOGÍA.....	15
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES	16
1.1. Introducción.....	16
1.2. Objetivos.....	17
1.2.1. OBJETIVOS GENERALES.....	17
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1.3. Problemática.....	18
1.4. Justificación.....	19
1.5. Hipótesis.....	20
1.6. metodología.....	20
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	23
2.1. EL ETANOL.....	23
2.1.1. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL ETANOL	23
2.1.2. USOS Y APLICACIONES.	25
2.1.3. Alcohol anhidro.....	26
2.1.4. Bioetanol	27
2.1.5. Bioetanol en el país.....	28
2.2. MÉTODOS PARA DESHIDRATACIÓN DEL ETANOL.....	29
2.2.1. Destilación azeotrópica.....	29
2.2.2. Destilación extractiva.....	31
2.2.3. Destilación con sal.....	33

2.2.4.	Destilación al vacío.....	35
2.2.5.	Per-vaporación.....	36
2.2.6.	Tamices moleculares.....	37
2.3.	ADSORCIÓN.....	38
2.3.1.	Fundamento.....	38
2.3.2.	Usos y aplicaciones.....	39
2.3.3.	Propiedades físicas de adsorbentes.....	39
2.3.4.	Tipos de materiales absorbentes.....	40
2.4.	EQUIPO DE ADSORCIÓN.....	42
2.4.1.	Adsorción en lecho fijo.....	42
2.4.2.	Regeneración.....	44
2.4.3.	Secado de gases.....	44
2.5.	Zeolitas.....	45
2.5.1.	Tipos de zeolitas.....	45
2.5.2.	Estructura de la zeolita.....	47
2.5.3.	Usos y aplicaciones.....	49
CAPÍTULO 3	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN.....	50
3.1.	CÁLCULOS EMPLEADOS PARA EL DISEÑO DEL CALENTADOR.....	51
3.1.1.	INTERCAMBIADOR DE CALOR (SUPERHEAT).....	51
3.1.2.	Cálculo de flujo másico de vapor necesario:.....	54
3.1.3.	Área de transferencia de calor del intercambiador adquirido.....	59
3.2.	TAMIZ MOLECULAR.....	60
3.2.1	Cálculo de velocidad superficial en el tamiz:.....	60
3.2.2	Cálculo de caída de presión por longitud de lecho:.....	61
3.2.3	Cálculo de la cantidad de zeolita necesaria para el proceso de adsorción:.....	63
3.2.4	Cálculo de la longitud de saturación:.....	67
3.2.5	Cálculo de la longitud de zona de transferencia:.....	68
3.2.2.	INTERCAMBIADOR DE CALOR (CONDENSADOR).....	70
3.3.	CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL EQUIPO DE DESHIDRATACIÓN.....	75
3.4.	CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA Y MATERIALES ESCOGIDOS.....	75
3.4.2.	TAMIZ MOLECULAR.....	83

3.4.3. Montaje de la estructura y de equipos.....	85
3.5. Costos.....	93
CAPÍTULO 4 MANUAL DE OPERACIÓN.	96
4.1. IDENTIFICACIÓN.....	96
4.2. EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL.....	100
4.3. MATERIALES.....	102
4.4. PROCEDIMIENTO PARA OBTENER ALCOHOL A UNA CONCENTRACIÓN MAYOR AL PUNTO AZEOTRÓPICO.	102
4.4.1. ARRANQUE DEL EQUIPO.....	102
4.4.2. OPERACIÓN DEL EQUIPO.....	104
4.4.3. PARADA DEL EQUIPO.....	109
4.5. PROCEDIMIENTO PARA REGENERAR EL TAMIZ MOLECULAR CON ALCOHOL ANHIDRO.....	111
4.5.1. ARRANQUE DEL EQUIPO.....	111
4.5.2. OPERACIÓN DEL EQUIPO.....	112
4.5.3. PARADA DEL EQUIPO.....	114
CAPITULO 5 RESULTADOS.....	116
5.1. EXPERIMENTACIÓN.....	116
5.1.2. Segunda Prueba.....	118
5.1.3. Regeneración.....	120
5.1.4. Tercera prueba.....	122
5.1.5. Regeneración.....	124
5.1.6. Cuarta Prueba.....	126
5.1.7. Regeneración.....	129
5.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	138
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	141
6.1. CONCLUSIONES.....	141
6.2. RECOMENDACIONES.....	142
ANEXOS.....	144
.....	145
.....	164
REFERENCIAS.....	166

ÍNDICE DE GRÁFICOS.

Figura 1. Diagrama de bloques del proceso de producción de bioetanol.	28
Figura 2. Diagrama de Flujo de destilación Azeotrópica.....	30
Figura 3. Diagrama de Flujo de destilación extractiva.	32
Figura 4. Diagrama de flujo de destilación salina.	35
Figura 5. Diagrama de flujo de la destilación al vacío.....	36
Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de pervaporación.....	37
Figura 7. Diagrama de proceso de deshidratación por medio de tamices moleculares.....	38
Figura 8. Zeolitas naturales.	46
Figura 9. Zeolitas sintéticas.	47
Figura 10. .Estructura de la Zeolita.	48
Figura 11. Usos y aplicaciones de la Zeolita.	49
Figura 12. Factor de corrección de saturación del tamiz molecular. Fuente: (Gas Processors Suppliers Association, 2004).....	64
Figura 13. Corrección de la capacidad del tamiz molecular por temperatura.	65
Figura 14. Colocación de accesorios para la prueba hidrostática.....	77
Figura 15. Prueba #1: Temperatura de salida del agua de 105 °C.....	79
Figura 16. Prueba #2: Temperatura de salida del agua de 104 °C.....	79
Figura 17. Prueba #4: Temperatura de salida del agua 107°C.	80
Figura 18. Prueba #3: Temperatura de salida del agua 107°C.	80
Figura 19. Sistema improvisado para probar el intercambiador de calor destinado a calentar la mezcla etanol-agua.	81
Figura 20. Dimensiones del condensado.	82
Figura 21. Dimensiones del calentador.	82
Figura 22. Colocación de equipos.	86
Figura 23. Estructura con los equipos montados.....	86
Figura 24. Tamiz molecular con sus líneas para regeneración.	88
Figura 25. Sistema con líneas de proceso construidas.	88
Figura 26. Líneas de vapor aisladas térmicamente.	89
Figura 27. Rotámetro.....	90
Figura 28. Diagrama para proceso de deshidratación de la mezcla etanol-agua.....	91
Figura 29. Diagrama para proceso de regeneración del lecho, ingresando etanol anhidro en contra corriente.....	92
Figura 30. Preparación de mezcla Etanol-Agua. Fuente: Salinas, David; Pactong, Solange.....	102
Figura 31. Ajuste de Válvulas abiertas y válvulas cerradas.	103
Figura 32. Controlador de flujo. Fuente: Pactong, Solange; Salinas, David.....	103
Figura 33. Llenando el tanque de alimentación con la mezcla preparada.....	104

Figura 34. Panel donde se encuentra el control de la bomba.....	104
Figura 35. Válvula del manifold que conecta a la línea de la unidad.	105
Figura 36. Válvulas de purga de condensado.	105
Figura 37. Válvula que permite el paso de vapor al equipo.	106
Figura 38. Válvulas que permiten el ingreso y salida del intercambiador.	106
Figura 39. Grifo de la red pública.	107
Figura 40. Termómetro indicando la temperatura del tamiz molecular.	108
Figura 41. Toma de muestra en probeta de 250 ml.	108
Figura 42. Vaso pequeño utilizado para extraer toda la alimentación remanente..	110
Figura 43. Remanente de alimentación.....	110
Figura 44. Ajuste de Válvulas abiertas y válvulas cerradas.	111
Figura 45. Controlador de flujo.....	112
Figura 46. Curva de Concentración Vs. Tiempo con alimentación a 95°GL.	
Elaborado por: (Pactong,Solange ; Salinas, David.)	117
Figura 47. Curva de Temperatura Vs. Tiempo con alimentación a 95°GL.	
Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, David).....	118
Figura 48. Curva de Concentración Vs. Tiempo con alimentación a 97°GL. Fuente: (Pactong,Solange ; Salinas, David.).....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 49. Curva de Temperatura Vs. Tiempo con alimentación a 97°GL. Fuente: (Pactong,Solange ; Salinas, David.).....	120
Figura 50. Curva de temperatura Vs. Tiempo con alcohol anhidro.....	121
Figura 51. Curva de Concentración Vs. Tiempo con alimentación de alcohol anhidro.	122
Figura 52. Curva de Temperatura Vs. Tiempo con alimentación a 91 °GL. Fuente: (Pactong,Solange ; Salinas, David.).....	123
Figura 53. Curva de Concentración Vs. Tiempo con alimentación a 91°C. Fuente: (Pactong,Solange ; Salinas, David.).....	124
Figura 54. Curva de Concentración Vs. Tiempo con alimentación de alcohol anhidro.....	125
Figura 55. Curva de Temperatura Vs. Tiempo con alimentación de alcohol anhidro.	126
Figura 56. Curva de Temperatura Vs. Tiempo con alimentación a 89°GL. Fuente: (Pactong,Solange ; Salinas, David.).....	128
Figura 57. Curva de Concentración Vs. Tiempo con alimentación a 89°GL. Fuente: (Pactong,Solange ; Salinas, David.).....	128
Figura 58. Curva de Temperatura Vs. Tiempo con alimentación de alcohol anhidro.	130
Figura 59. Curva de Concentración Vs. Tiempo con alimentación de alcohol anhidro.....	130
Figura 60. Variación de datos de la temperatura de todas las muestras.	132
Figura 61. Variación de Temperatura de entrada del tamiz	133
Figura 62. Variación de temperatura de salida de tamiz molecular	134
Figura 63. Intercambiadores de calor antes de darle mantenimiento.....	150

Figura 64. Super Heat antes del mantenimiento.....	150
Figura 65. Realizando ajustes en el Tamiz. Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.).....	151
Figura 66. Preparando tamiz molecular para montarlo. Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.).....	151
Figura 67. Pruebas para verificación de fugas en el Tamiz molecular Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.).....	151
Figura 68. Tamiz molecular pintado. Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.)	152
Figura 69. Bridas del tamiz molecular pintadas. Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.).....	152
Figura 70. Realizando el montaje de la unidad deshidratadora. Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.).....	153
Figura 71. Colocando la Zeolita en el tamiz molecular. Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.).....	153
Figura 72. Unidad deshidratadora de etanol finalizada. Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.).....	153
Figura 73. Super calentador montado. Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.).....	154
Figura 74. Tamiz molecular montado. Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.)	154
Figura 75. Condensador montado. Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.)	154
Figura 76. Aislado la línea de vapor que se conectan a nuestro equipo. Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.).....	155
Figura 77. Obtención de etanol anhidro. Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.).....	155
Figura 78. Realizando las pruebas en la unidad deshidratadora de etanol. Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.).....	155
Figura 79. Diseño interior y exterior del condensador.....	156
Figura 80. Diseño interior y exterior del intercambiador de calor.	157
Figura 81. Diseño interior y exterior del Tamiz molecular.	158
Figura 82. Esquema en 3D de la unidad deshidratadora de Etanol, vista Frontal...	159
Figura 83. Esquema en 3D de la unidad deshidratadora de Etanol, vista posterior.	160
Figura 84. Esquema en 3D de la unidad deshidratadora de Etanol, 4 vistas Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.).....	161
Figura 85. Especificaciones de Tubería de acero inoxidable.....	162
Figura 86. Especificaciones de Tubería de Cobre.....	163
Figura 87. Especificaciones del termómetro con vástago.	164
Figura 88. Especificaciones de los intercambiadores de calor.	165

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades físicas del alcohol etílico	23
Tabla 2. Propiedades químicas del alcohol etílico.	25
Tabla 3. Constantes acorde al tipo de partícula	62
Tabla 4. Propiedades del etanol a temperatura media	62
Tabla 5. Longitud del lecho a diferentes diámetros.	69
Tabla 6. Propiedades a utilizar en los cálculos.....	71
Tabla 7. Condiciones de operación del sistema del sistema.....	75
Tabla 8. Distribución del interior del tamiz molecular.	84
Tabla 9. Inversión del proyecto.	94
Tabla 10. Identificación de los diferentes componentes que conforman el sistema de deshidratación.	96
Tabla 11. Factores de riesgo en la unidad de deshidratación de etanol.	99
Tabla 12. Equipos de protección personal necesarios para la operación de la unidad de deshidratación de etanol.	100
Tabla 13. Datos de la primera prueba.....	116
Tabla 14. Resultados de la primera Experimentación	117
Tabla 15. Datos de la segunda prueba	118
Tabla 16. Resultados de la Segunda experimentación.	119
Tabla 17. Datos de la Regeneración después de la segunda prueba.	120
Tabla 18. Resultados de la regeneración	121
Tabla 19. Datos de la tercera prueba	122
Tabla 20. Resultados de la tercera experimentación.....	123
Tabla 21. Datos de la regeneración luego de la tercera prueba.	124
Tabla 22. Resultados de la regeneración.	125
Tabla 23. Datos de la Cuarta Prueba	126
Tabla 24. Resultados de la cuarta experimentación.	127
Tabla 25. Datos de la Regeneración de la cuarta prueba.....	129
Tabla 26. Resultados de la regeneración.	129
Tabla 27. Resultados de datos estadísticos.....	133
Tabla 28. Tiempo que el lecho se comienza a saturar a diferentes concentraciones	137
Tabla 29. Costos operativos del sistema	138

SIMBOLOGÍA

C_p = Calor específico a presión constante, $\frac{BTU}{lb \text{ } ^\circ F}$

λ =Calor latente de vaporización, $\frac{BTU}{lb}$

$^\circ GL$ = Gay Lussac, Grado alcohólico volumétrico.

Gpm= Galones por minuto

T_s = Temperatura de saturación, $^\circ F$

U_d = Coeficiente global de transferencia de calor, $\frac{BTU}{h \text{ pies}^2 \text{ } ^\circ F}$

M_v = Flujo másico de vapor, lb/h.

F_{mezcla} = Flujo másico de alimentación de la mezcla etanol-agua, lb/h.

W_r = Agua a remover por ciclo, lb

C_{ss} = Factor de corrección de la saturación del tamiz

CT = Factor de corrección de temperatura.

S_s = Libras de tamiz molecular necesario.

P_{sig} = Pounds per square inch gauge (libras por pulgada cuadrada manométrica)

ΔP = Caída de presión

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1. INTRODUCCIÓN.

El punto azeotrópico para la mezcla etanol – agua, teóricamente en porcentaje másico es del 95%, y en volumen es del 96% (^oGL). Para poder romper el punto azeotrópico de esta mezcla construimos un sistema que consta de la operación unitaria llamada adsorción, utilizando un lecho adsorbente de zeolita sintética 3Å, equipo que servirá para prácticas del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la carrera de Ingeniería Química de la ESPOL.

El proceso implementado consiste en la adsorción de las moléculas de agua que tienen un tamaño de 2.8 Å que son adsorbidas en el lecho de zeolitas que tienen poro de 3Å, mientras que las moléculas de etanol no logran ser retenidas por la zeolita al ser del tamaño de 4.4 Å.

El sistema implementado está siendo comúnmente usado a nivel industrial. Empresas reconocidas a nivel nacional que tienen este corebusiness manejan esta tecnología.

1.2. OBJETIVOS.

1.2.1. OBJETIVOS GENERALES.

Implementar un sistema de adsorción, que permita obtener una concentración de etanol mayor al de su punto azeotrópico, partiendo ya sea de una mezcla etanol-agua con una concentración menor al punto azeotrópico o utilizando el destilado obtenido de la torre de destilación de lecho empacado existente en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOPU), para que el estudiante profundice sus conocimientos teóricos.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Diseñar y construir un equipo utilizando una mezcla etanol-agua a una concentración menor al punto azeotrópico (96 ° GL).
- Realizar distintas pruebas para llegar a conocer las variables que requieren ser modificadas y así encontrar el modo de uso óptimo del equipo.
- Obtener etanol con una concentración mayor al de su punto azeotrópico para que los alumnos que usen el equipo puedan profundizar el estudio de los métodos implementados para lograr tal concentración.
- Elaborar una guía para el manejo del equipo, de una manera didáctica para el entendimiento de los estudiantes y profesores que requieran usarlo.

1.3. PROBLEMÁTICA.

El LOPU cuenta con variedad de equipos para diferentes Operaciones Unitarias estudiadas durante la carrera, pero aun así existe la falta de los mismos o de complementos que sirvan para una demostración más detallada y útil para el conocimiento del estudiante.

Como ha sido del conocimiento de las personas involucradas a la carrera, la falta de equipos, más allá de ser algo que ha impedido al estudiante tener una mejor visión de lo que estudia, ha permitido que los estudiantes vean una oportunidad de mejora, por lo cual se diseñan y construyen equipos necesarios para las prácticas de las diferentes materias, para así forjar en conjunto con las autoridades y profesores, mejoras para el LOPU que le permitan al estudiante conocer el manejo de equipos a escala piloto como un preámbulo a lo que tendrá que afrontar en su vida como profesional.

Por lo general a nivel industrial se cuenta con operadores que realizan la manipulación de los equipos, pero el ingeniero Químico a cargo del área debe saber también de la manipulación de los mismos.

Se dispone de dos unidades de destilación, las cuales difieren en capacidad, un destilador con platos, y otro destilador con relleno, ambos equipos están habilitados para funcionar en la actualidad, pero son unidades que como máximo solo permiten destilar hasta una concentración del 95% en peso, cabe

recalcar que el destilador de lecho empacado es el que más se aproxima a este.

1.4. JUSTIFICACIÓN.

Para los estudiantes de Ingeniería Química es de gran importancia reforzar al máximo el estudio de las diferentes Operaciones Unitarias, por eso contamos de un laboratorio en el cual se pone en práctica lo aprendido teóricamente, llevándolo a cabo en el LOPU; actualmente se cuenta con equipos que realizan la destilación binaria (a presión atmosférica), obteniendo concentraciones de etanol por debajo del 95% en peso, por lo tanto es necesario un equipo que pueda romper el punto azeotrópico para así conocer su funcionamiento y a la vez ampliar los conocimientos de los estudiantes con otra operación unitaria que se lleva a cabo como la adsorción.

El equipo contará con operaciones unitarias fundamentales como las ya mencionadas en este caso adsorción, destilación, y se aplicarán conocimientos de transferencia de calor, termodinámica y balance de materia y energía.

Es necesario poder aplicar una mejora continua a todo sistema, y el laboratorio no debe ser la excepción, se debe siempre incentivar a mejorar los diseños ya implementados y a su vez darles una mejor versatilidad a los equipos. Quedará a disposición del profesor usar el sistema de tamiz molecular o usar el método

tradicional, pero esto brindará una mejor perspectiva a los estudiantes de la diferencia de ambos métodos y su aplicación a nivel industrial.

El motivo por el cual se eligió este método, justamente es porque está siendo implementado frecuentemente en la industria de la destilación. Otro de los factores a tomar en cuenta del por qué es necesario implementar este sistema en nuestro laboratorio, es el hecho de que el país está implementando proyectos relacionados al alcohol anhidro, con el fin de poder modificar la gasolina añadiéndole etanol, como es el caso de la gasolina Ecopaís; y es por esto que como ingenieros químicos, se debe estar al tanto de los procesos de obtención del alcohol anhidro ya que es una industria que está tomando un impulso por el cambio de matriz energética que se está implementando.

1.5. HIPÓTESIS.

Mediante la implementación de una unidad con un lecho específico se obtendrá etanol de alta pureza, mayor al punto azeotrópico.

1.6. METODOLOGÍA

FASE 1. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

El proyecto empezó con las respectivas investigaciones y estudios acerca de la deshidratación del alcohol y sus diferentes métodos, una vez recopilada toda la información necesaria se procedió a analizarla y elegir uno de dichos métodos por sus distintas ventajas y características.

El método elegido fue el de tamices moleculares ya que con la información pudimos constatar que era el apropiado a la disponibilidad económica y a su información disponible industrialmente en el país, en este caso se hicieron consultas sobre la operación de los tamices moleculares en empresas reconocidas a nivel nacional.

FASE 2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE ADSORCIÓN

La información encontrada en las diferentes fuentes bibliográficas nos permitió realizar el diseño del equipo, determinando el área de transferencia de calor necesaria tanto para calentar como para condensar en el sistema, el diámetro y longitud del lecho, así como también la cantidad que se requiere de zeolita.

Una vez que se calcularon las dimensiones de los equipos, se averiguó sobre los distintos materiales necesarios para la construcción del equipo.

La construcción implica la mano de obra, construcción de equipos principales, accesorios para tuberías, y tuberías para las líneas del sistema y de vapor.

FASE 3. FASE DE EXPERIMENTACIÓN.

Para la experimentación se utilizó una muestra en fase líquida de una mezcla etanol-agua colocando en una probeta cierta cantidad de zeolita para observar cómo se realizaba la adsorción. Al final de la prueba no se obtuvieron

resultados favorables, ya que solo se concentró la mezcla de 89 a 90 ° GL. Esto se debe a que las moléculas de agua y etanol cuando se encuentran en estado líquido no están separadas como en el caso de una fase vapor, lo cual permite que las moléculas de agua sean retenidas con mayor facilidad en fase vapor, es por esta razón se decidió hacer el proceso tal y como se lo hace industrialmente; en fase vapor.

Cuando ya estuvo terminado el equipo, la experimentación se la realizó utilizando diferentes concentraciones, por lo general menores al punto azeotrópico, logrando el objetivo planteado.

FASE 4. ANÁLISIS Y REPORTE DE RESULTADOS

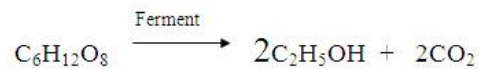
Culminada la etapa de experimentación se analizaron los resultados obtenidos reportando en tablas y gráficas el comportamiento de los diferentes parámetros. Por ejemplo, la variación de la concentración obtenida como producto con respecto al tiempo debido a la saturación del lecho y la variación de temperatura de la mezcla etanol-agua a la entrada del tamiz con respecto al tiempo.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. EL ETANOL

El etanol es una sustancia incolora, soluble en agua debido a sus características compatibles entre ambos compuestos. El etanol no es posible concentrarse mayor a su punto azeotrópico por métodos convencionales en una mezcla etanol-agua debido a que la misma tiene un punto de ebullición constante. La obtención del etanol se da por fermentación de líquidos azucarados por medio de una enzima (levaduras de cervezas), produciendo el etanol y compuestos secundarios como dióxido de carbono.



2.1.1. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL ETANOL

El alcohol etílico posee las siguientes propiedades físicas y químicas [1].

Tabla 1. Propiedades físicas del alcohol etílico

PROPIEDADES FÍSICAS	
Estado de Agregación	Líquido
Apariencia	Incoloro
Densidad	810 Kg/m ³
Masa molecular	46,07 uma
Punto de fusión	158,9 K = -114,1 °C
Punto de Ebullición	351,6 K = 78,6 °C

Temperatura crítica	514 k = 241°C
Presión crítica	63 atm

Fuente: (Ecured, n.d)

El alcohol etílico con fórmula C_2H_6OH o CH_3CH_2OH es un líquido de apariencia incolora, muy volátil y con un olor característico, fuerte dependiendo de su concentración.

Se obtiene, básicamente al tratar ácido sulfúrico con etileno con una hidrólisis posterior, existen otras formas de sintetizar alcohol etílico como lo es el método de Fischer-Tropsch que se refiere a la hidrogenación catalítica con CO, naturalmente también se lo puede obtener por medio de fermentación con levaduras partiendo de frutas, maíz o caña de azúcar.

En el caso de la solubilidad, es importante recalcar que disminuye al aumentar la cantidad de carbonos, esto es porque el grupo hidroxilo (OH^-) que ayuda a la formación de puentes de hidrógeno con el agua, se convierte en una porción relativamente pequeña comparado con la cadena de carbonos, de tal forma que a partir de la cadena de 4 carbonos el alcohol tiene una solubilidad baja y al llegar a 6 carbonos en su cadena de alcohol ya no es soluble con el agua sino con solventes orgánicos.

El punto de ebullición del alcohol, también es fuertemente influenciado por los puentes de hidrógeno, el grupo hidroxilo presente en una cadena de hidrocarburos hace que el punto de ebullición sea mayor en comparación a una cadena que tenga la misma cantidad de carbonos. [2]

Tabla 2. Propiedades químicas del alcohol etílico.

PROPIEDADES QUIMICAS	
Acidez	15,9
Solubilidad en agua	Miscible
KPS	No aplica
Ho gas	-235,3 KJ/mol
Ho Líquido	-277,6 KJ/mol
So Líquido (1 bar)	161,21 J / mol °K
Alcalinidad	Negativo

Fuente: (Ecured, n.d)

El etanol es un líquido que por su volatilidad genera vapores, los cuales pueden generar mezclas explosivas debido a su alto nivel de inflamabilidad.

Sus reacciones suelen ser muy vigorosas cuando reacciona con los siguientes reactivos: nitrato de plata, peróxido de hidrógeno, ácido permangánico, ácido nítrico, trióxido de cromo, dióxido de potasio, permanganato de potasio, entre otros. Sin embargo si existe compatibilidad con ácidos, cloruros de ácido, metales alcalinos, oxidantes y reductores.

2.1.2. USOS Y APLICACIONES.

a) Industrial

Básicamente el alcohol etílico es muy utilizado a nivel industrial, ya sea por ejemplo como solvente y como alcohol carburante para ser mezclado con gasolina disminuyendo la emisión de CO₂ de los combustibles y a su vez

elevant el octanaje en reemplazo de productos dañinos para la sociedad y el ambiente [3].

En la industria farmacéutica se lo utiliza de manera muy amplia como es el caso del alcohol antiséptico que contiene 70°GL, así como también es el componente principal de cosméticos, perfumes y diferentes productos de esta área.

En el caso de la industria química aparte de utilizarse como disolvente de diversos productos como pinturas, barnices, lacas, etc., también se lo emplea frecuentemente para la síntesis de otros productos como acetato de etilo, éter di-etílico, entre otros [4].

Finalmente, pero no la menos importante se encuentra la industria alimenticia en dónde también se utiliza alcohol etílico para emplearlo en diferentes licores, postres, etc.

2.1.3. Alcohol anhidro.

El etanol anhidro es aquel que por medio de operaciones adicionales a la destilación se consigue obtener un grado alcohólico mayor de 99,9% en volumen.

Es un producto muy utilizado como solvente en trabajos de impresión, disolvente en la fabricación de plásticos y principalmente como aditivo para la gasolina, reduciendo las emisiones de CO₂ provocados por la misma. [5]

2.1.4. Bioetanol

El bioetanol es un combustible que tiene origen vegetal, ya que se suele formar a partir de una fermentación de una sustancia rica en azúcares como la proveniente de caña, remolacha o por medio de los azúcares presentes en distintos cereales. Se parte de almidón o celulosa, los cuales se hidrolizan para así tener el objetivo a fermentar, es decir la glucosa que será sometida a fermentación para obtener alcohol del mismo. Este biocombustible es el que mayor demanda mundial tiene, con más de 40000 millones de litros al año.

Fuentes de glucosa:

- Maíz.
- Caña de azúcar.
- Celulosa proveniente de maderas.
- Papa.
- Trigo.

El bioetanol tiene la capacidad de ser mezclado con la gasolina, del 5 al 10% es el rango que puede contener la gasolina sin ser necesario cambiar las tecnologías de los motores comunes. [6]

2.1.5. Bioetanol en el país.

Ecuador comenzó con el proyecto de producir gasolina mezclada con etanol desde el año 2010, teniendo el producto conocido como Ecopaís (E-5) que tiene 5 % de etanol.

El Gobierno tiene proyectado expandir la producción de etanol a 400 millones de litros al año, teniendo actualmente una capacidad de 40 millones de litros de etanol al año.

Proceso general de producción de gasolina mezclada con etanol:

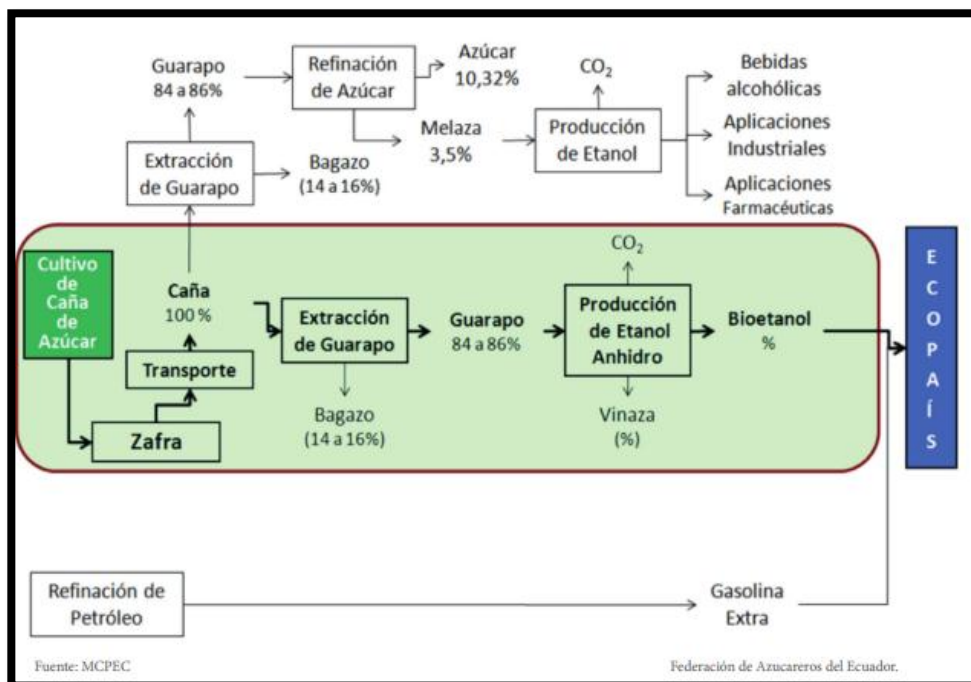


Figura 1. Diagrama de bloques del proceso de producción de bioetanol.

Fuente: Biocombustibles. Artículo PROECUADOR (2013).
Disponible en: <http://www.proecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2015/06/Perfiles-de-Inversiones-Promocion-de-Inversiones/Perfiles-de-Inversion/Biocombustibles.pdf>

La caña de azúcar es pasada por los molinos para extraer su jugo azucarado, el jugo o guarapo se lo clarifica y es enviado hacia la destilería en donde se procede a la producción de etanol anhidro o bioetanol, teniendo como productos secundarios la vinaza y el CO₂. Este bioetanol es el que se utiliza junto con la gasolina extra para formar la gasolina Ecopaís (PRO ECUADOR, 2013).

2.2. MÉTODOS PARA DESHIDRATACIÓN DEL ETANOL.

2.2.1. Destilación azeotrópica

El punto de ebullición de la mezcla binaria etanol-agua es de 351.3 K, Young en 1902 añadió benceno a la mezcla azeotrópica y se formó una mezcla ternaria azeotrópica con punto de ebullición de 338 K, comparando este valor con el de la mezcla binaria se puede notar que es menor en la mezcla ternaria. La concentración en el punto azeotrópico de la mezcla etanol-agua es de 89% molar. [8]

La destilación común no permite la obtención de una mayor concentración de etanol; al añadir el benceno el cual es prácticamente no polar, tendrá la labor de volatilizar el agua (altamente polar) en una mayor proporción que el etanol (medianamente polar).

La torre # 1 en su producto de cabeza se tiene el azeótropo ternario mientras que su producto de cola se obtiene el etanol anhidro, el producto de cabeza

se lo lleva a condensador en donde hay una separación en dos fases por medio de decantación.

De estas dos fases, la fase más rica en benceno retorna a la columna #1 como reflujo, mientras que la otra fase que tiene mayor concentración de etanol y agua van hacia a la torre #2 y torre #3 que se encargan de la recuperación de benceno y la segunda para la separación de agua respectivamente. Los productos de cabeza regresan hacia la primera columna. [9]

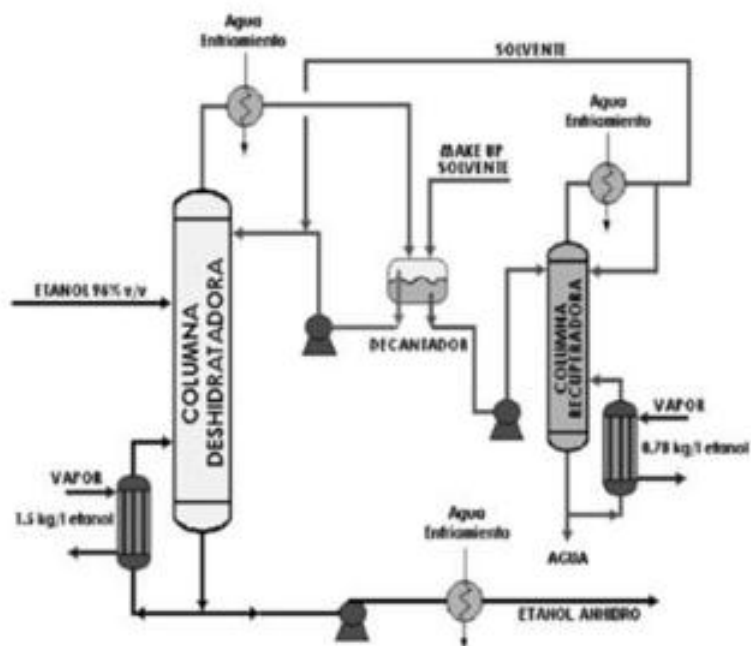


Figura 2. Diagrama de Flujo de destilación Azeotrópica

Fuente: Uyazán, Aguilar; Rodríguez, Caicedo. (diciembre, 2004).
Disponible en: www.redalyc.org/pdf/643/64324308.pdf

2.2.2. Destilación extractiva

La destilación extractiva consiste en agregar un solvente o un agente que ayude a separar la mezcla azeotrópica, caracterizándose por no formar azeótropos con algún componente a separar.

La sustancia agregada modifica las volatilidades relativas de los componentes, y es por esta razón que el solvente debe tener una volatilidad baja para que se logre quedar en la fase líquida, cabe recalcar que también debe tener un punto de ebullición mayor al de los otros 2 componentes para asegurar el contacto con la mezcla en la columna, es completamente miscible con los demás componentes y es recomendado ser añadido en una zona cercana a la condensación. Otra de las características que suelen tener estos solventes usados en este tipo de destilación es que deben ser poco viscosos, poco tóxicos y ser de bajo costo. En comparación a la destilación azeotrópica que ha sido usada durante mucho tiempo, tiene la ventaja que el etanol anhidro obtenido no presenta trazas del solvente o del agente que ayuda a la separación, lo cual es muy útil para la industria alimenticia y farmacéutica.

Este tipo de destilación es comúnmente usada en la industria petroquímica para la separación de sistemas azeotrópicos en donde sus puntos de ebullición son cercanos. Entre los agentes que ayudan a realizar este tipo de extracción se encuentran los glicoles, fenoles, tiofenos, aminas, parafinas, entre otros.[10]

Para la selección del solvente es necesario realizar un estudio de su efectividad la cual está basada en las variaciones en la no idealidad de la fase líquida de los componentes que se desea separar. En el proceso se suele utilizar una columna que dispone de 2 alimentaciones y otra columna que se encarga de recuperar el solvente utilizado en el proceso.

La alimentación es la mezcla binaria de los componentes que se desea separar, el solvente se añade en la zona superior de la columna; en la primera columna se obtiene el destilado de un componente con alta pureza (etanol anhidro), mientras que el agua junto con el solvente forma parte del producto de cola, estos se envían a la segunda columna en donde el destilado es el agua y el producto de fondo es el solvente que es recirculado a la primera columna. [8]

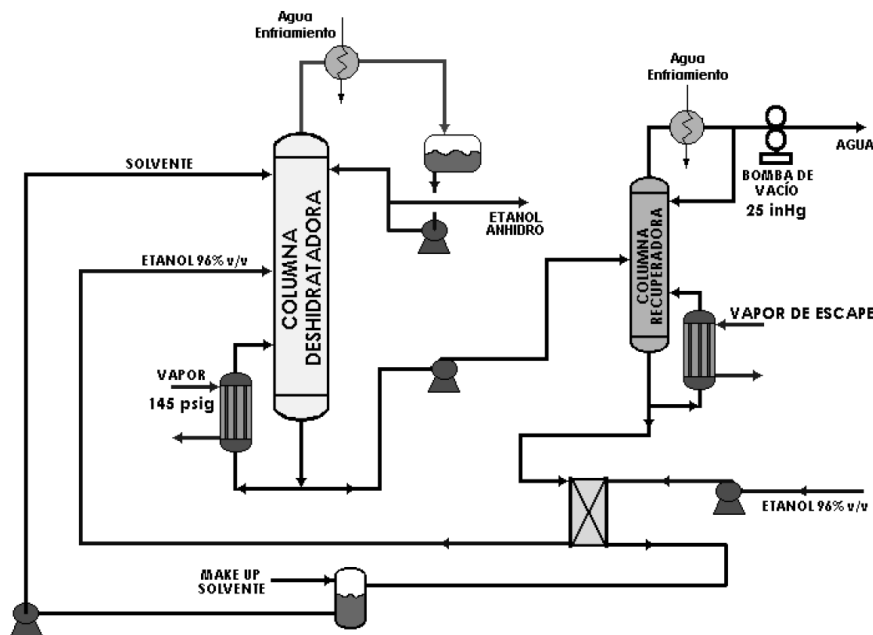


Figura 3. Diagrama de Flujo de destilación extractiva.

Fuente: Uyazán, Aguilar; Rodríguez, Caicedo. (diciembre, 2004).
 Disponible en: www.redalyc.org/pdf/643/64324308.pdf

2.2.3. Destilación con sal

La destilación extractiva salina se relaciona con la sal que puede admitir la mezcla, para la mezcla etanol-agua en su punto azeotrópico es muy común usar el acetato de potasio la cual tiene la propiedad de eliminar el azeótropo. Este tipo de destilación fue estudiada por Meranda y Furter en 1966, Zemp en 1989, y Vercher en 1991. [10]

La característica de esta sal de no ser tóxica es que hace preferible optar por su uso a nivel industrial. La sal se alimenta en una corriente de reflujo caliente del sistema entra en forma de disolución. Para que la separación de los componentes sea eficiente, la sal entrante debe tener la capacidad de solubilizarse en los componentes de la mezcla en el rango de composición que hay a lo largo de la columna; esta sal al no ser volátil se quedará en la fase líquida haciendo el trabajo de modificar la volatilidad relativa del sistema. La sal es recuperada en el producto de cola el cual está con un ingreso de calor adicional con el fin de evaporar en su mayoría el líquido. Se podría asegurar que terminó de evaporar todo fundiendo la sal, pero esto dependerá si la sal no sufrirá una descomposición debido a la alta temperatura, en el caso de que ocurra esto se suele aplicar un sistema de secado por aspersion.

El producto de fondo de la columna de destilación es una solución acuosa de la sal, la cual es evaporada en proceso de evaporación de múltiple efecto. En

sistema de secado por aspersión se seca completamente la sal, la misma que es reciclada en su totalidad para el proceso.

Por lo general el uso de sal causa mejores efectos por su selectividad en comparación a los efectos causados por el uso de un solvente líquido, por lo cual se suele usar recomendadamente una relación peso de sal/ alimento como máximo de 0.1.

La desventaja de este método es que la sal suele presentar problemas de disolución y posterior recristalización, su solubilidad depende de su afinidad por los componentes de la mezcla, aparte es necesario el uso de materiales que resistan la corrosión.

Las sales utilizadas comúnmente para este tipo de destilación tenemos:

Cloruro de potasio, cloruro cúprico, acetato de sodio, cloruro de calcio, yoduro de potasio, cloruro de cobalto II, cloruro de níquel II, nitrato de calcio, acetato de potasio y yoduro de sodio. De acuerdo a la experimentación se ha observado que las sales con catión divalente tienen mejor efectividad que las sales monovalentes. [10]

Para la elección de la sal se tiene en cuenta el costo, la toxicidad, estabilidad química, baja capacidad de corroer los materiales, y alta solubilidad. [11]

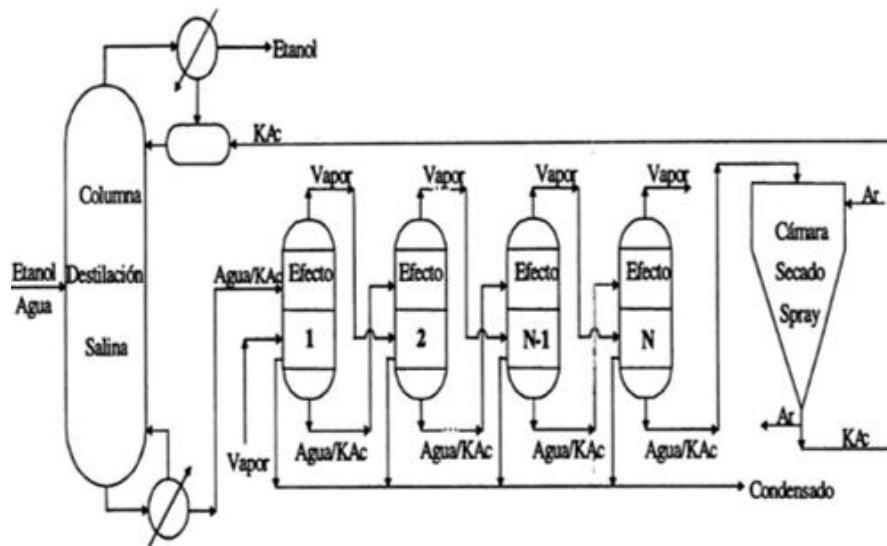


Figura 4. Diagrama de flujo de destilación salina.

Fuente: E.L. Ligeró; T.M.K. Ravagnani (2000)

2.2.4. Destilación al vacío

Esta metodología suele utilizar un sistema de dos columnas, en el que la primera columna es alimentada por la solución, en este caso la mezcla etanol-agua, la cual es llevada a su composición en el punto de azeótropo obteniéndose en la corriente de destilado. El destilado de la primera columna se lleva a una segunda columna que es sometida a vacío. Una presión al vacío menor a 11.5 KPa ocasiona que el azeótropo se desestabilice y logra obtener un etanol con una concentración mayor al 99% volumétricamente. La desventaja de este método es su alto consumo de energía debido a que por lo general es necesario un número de etapas mayores a 60, aparte de que las columnas necesitan para su diseño un diámetro muy grande.[11]

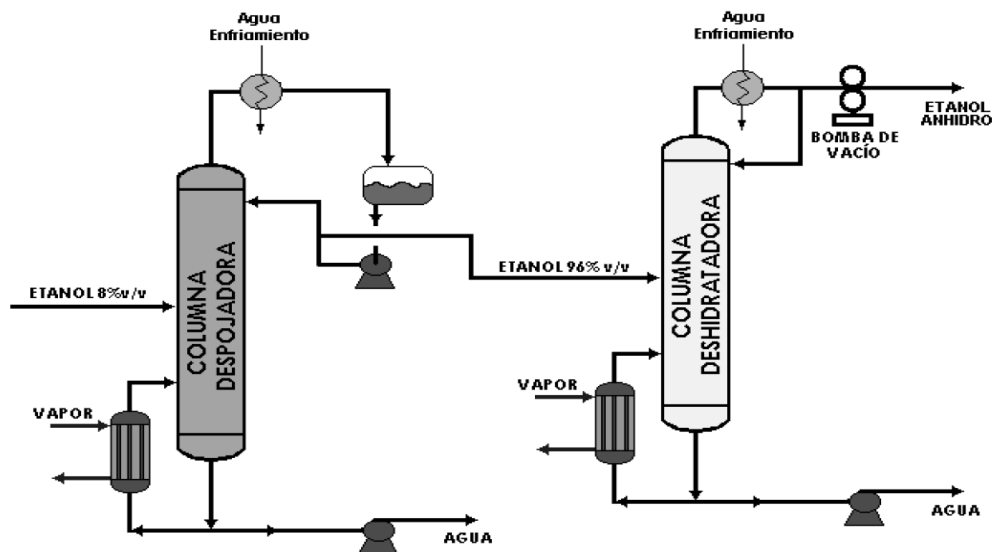


Figura 5. Diagrama de flujo de la destilación al vacío.

Fuente: Uyazán, Aguilar; Rodríguez, Caicedo, (diciembre, 2004).
 Disponible en: www.redalyc.org/pdf/643/64324308.pdf

2.2.5. Per-vaporación

La palabra pervaporación proviene de su permeación y evaporación. Esta metodología se basa en la separación de componentes orgánicos volátiles de una mezcla acuosa realizando un proceso de evaporación, utilizando membranas similares a las usadas en el proceso de ósmosis inversa. La fuerza impulsora de la pervaporación está dada por la diferencia de presiones parciales entre la alimentación (líquido) y el vapor que se ha permeado y es mantenida por medio de vacío por el lado de la membrana (permeado), esto permite la transferencia de masa. [12]

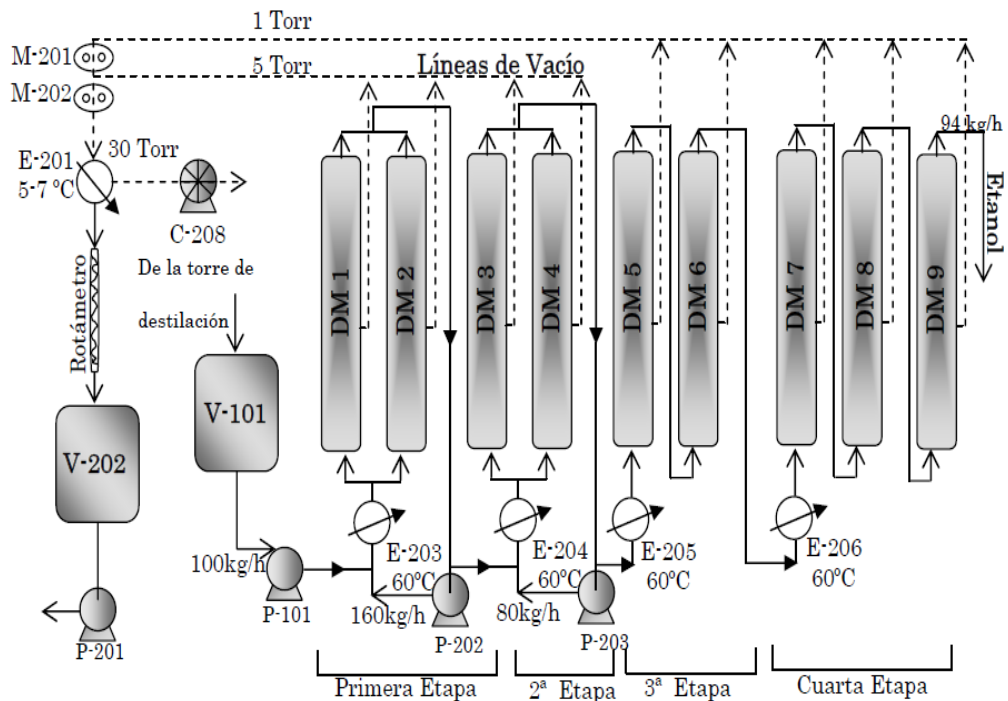


Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de per vaporación.

Fuente: López, Jimmy; Lozada, Herlendy (2005).

2.2.6. Tamices moleculares.

Se refiere a un proceso de destilación normal seguido por tamices moleculares que pueden ser materiales de forma esférica sintetizados a partir de compuestos de aluminio y silicatos con una excelente capacidad para retener sustancias en sus pequeños poros, las sustancias que quedan atrapadas suelen ser solventes, en especial agua.

El proceso que se lleva a cabo puede ser tanto en líquido como en fase vapor.

En el caso de implementar la operación en fase líquida es necesario hacer

pasar un gas inerte caliente como el CO_2 o N_2 para la regeneración del lecho, este gas debe cumplir con ciertos parámetros como tener una presión de 200 psig y no contener oxígeno ni humedad.

Para la operación en fase vapor se utiliza generalmente dos lechos de tamices moleculares, uno para llevar a cabo el proceso de deshidratación y el otro para que realice la regeneración, aquí se hace pasar alcohol anhidro entre el 15-40% del que ha sido previamente deshidratado [13]

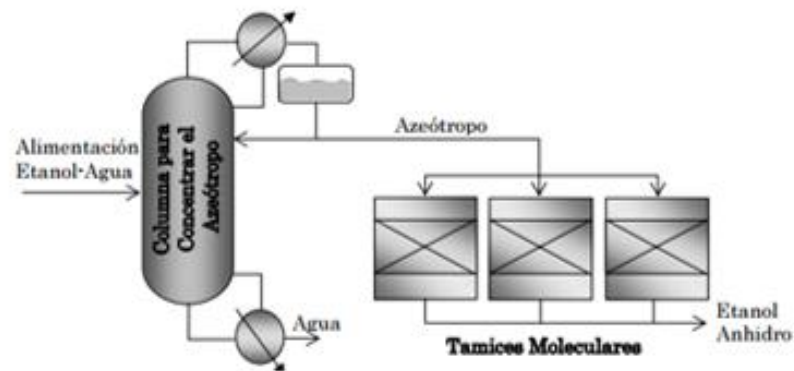


Figura 7. Diagrama de proceso de deshidratación por medio de tamices moleculares.

Fuente: López, Jimmy; Lozada Herlenny (2005). Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/11051604.pdf>

2.3. ADSORCIÓN

2.3.1. Fundamento

Es un proceso que comúnmente es utilizado para la separación de mezclas líquidas o gaseosas, utilizando un material sólido que tiene poros que son los

encargados de adsorber de manera selectiva algún componente del fluido a tratarse. A nivel industrial, el sólido adsorbente es utilizado hasta que llegue casi a su saturación que es cuando se decide utilizar un segundo lecho que se encargue de la separación mientras que el primer lecho es regenerado o sustituido. El proceso de intercambio iónico también es considerado como un proceso de adsorción, como por ejemplo el ablandamiento de agua que consiste en pasar el fluido por un lecho de resina que se encarga del intercambio iónico. [14]

2.3.2. Usos y aplicaciones

Los usos y aplicaciones de los diferentes materiales adsorbentes son [14]:

- Eliminación de compuestos orgánicos que se encuentran presentes en el agua.
- Eliminación de impurezas coloreadas de sustancias orgánicas.
- Separación de parafinas de compuestos aromáticos.
- Deshidratación en una fase gaseosa de hidrocarburos.
- Eliminación de compuestos azufrados del gas natural.
- Eliminación de disolventes, gases u olores que tenga el aire.

2.3.3. Propiedades físicas de adsorbentes.

Los adsorbentes se encuentran disponibles en una gran variedad para diferentes separaciones, por lo regular suelen venir en presentaciones esféricas, o gránulos que tienen un tamaño que va de 0.1 a 12 mm. Estas

partículas cuentan con una gran cantidad de poros muy finos, y su volumen puede llegar a ser el 50% del volumen total de la partícula.

La adsorción física o también llamada adsorción de Van der Waals suele darse a cabo en la superficie interna del poro, y el proceso es reversible. [14]

2.3.4. Tipos de materiales absorbentes

En el mercado existe una gran variedad de adsorbentes para diferentes usos entre los cuales se mencionan algunos a continuación [15]:

2.3.4.1. Resinas sintéticas: Son polímeros que dependiendo de su origen serán capaces de adsorber diferentes compuestos, como por ejemplo las resinas hechas a base de compuestos aromáticos tienen su uso para la adsorción de compuestos orgánicos que son no polares encontradas en soluciones acuosas; mientras que las resinas provenientes de ésteres acrílicos se suelen dar uso para la adsorción de solutos polares en soluciones acuosas. El área superficial suele ser mayor a 1100 m²/g, y suelen tener características más hidrofóbicas que el carbón activado granular.

2.3.4.2. Gel de sílice: Es un adsorbente amorfo formado a partir de silicato de sodio, su área superficial suele estar en el rango de 600-800 m²/g, con un rango de diámetro de poro entre 20-50 Å; su aplicación se da comúnmente en la adsorción de agua, alcoholes, aminas, y para fraccionamiento de hidrocarburos. En comparación con

desecantes de características zeolíticas, la sílica gel tiene menor capacidad al momento de la aplicación de deshidratación, pero sin embargo la regeneración de la sílica gel se da a 150⁰ C y en cambio la de materiales zeolíticos se da a temperaturas aproximadas de 350⁰ C.

2.3.4.3. Carbón activado: Adsorbente de material carbonáceo microcristalino, muy conocido desde hace mucho tiempo, que cuenta con áreas superficiales que están en el rango de 300-1200m²/g y un rango de diámetro de poro entre 10-60 Å, su orientación se da de manera aleatoria, y la obtención de este adsorbente se da por medio de una descomposición térmica de materiales carbonáceos y luego es sometido a un proceso de activación. El proceso a nivel industrial consiste en calentar la materia carbonácea en un rango de 400-500⁰ C de manera anaeróbica con el fin de eliminar compuestos volátiles, durante este procedimiento se van formando poros en el sólido mientras que uno de los métodos de activación es la de usar vapor a una temperatura aproximada de 1000⁰ C.

Este material es comúnmente utilizado para la adsorción de compuestos orgánicos, azul de metileno, tetracloruro de carbono, fenoles; remoción de sabores, colores y olores por lo regular del agua. También tiene su aplicación actualmente en la decoloración

de jugos azucarados, en la purificación del hidrógeno. Es importante tener en cuenta su punto de inflamación, su contenido de cenizas y la composición de la misma, el pH del agua cuando ha tenido contacto con el carbón activado.

2.3.4.5. Alúmina activada: Material obtenido a base del óxido de aluminio, el rango de área superficial que suelen tener está en el rango de 200-500 m²/g y cuenta con rango de diámetro de poro entre 20-140 Å, su aplicación común es para el secado de gases y líquidos.

2.3.4.6. Tamiz molecular de zeolitas: Las zeolitas son materiales de aluminosilicatos de red cristalina y una porosidad uniforme. El diámetro del poro se diferencia al de los demás adsorbentes que cuentan con un gran rango de tamaños de poro. Comercialmente hay zeolitas que tienen diámetros de poro de 3-10 Å. La aplicación de este adsorbente va desde la deshidratación de compuestos, hasta la separación de hidrocarburos u otros componentes de ciertas mezclas, entre otros.

2.4. EQUIPO DE ADSORCIÓN

2.4.1. Adsorción en lecho fijo

Los equipos que contienen el tamiz molecular presentan un lecho que va de 0.3 a 1.2 m de diámetro el cual está colocado sobre una placa perforada para el paso del fluido. El sistema adsorción suele venir acompañado de un

segundo tamiz con el fin de tener un sistema con regeneración incluida, mientras un tamiz trabaja, el otro se encuentra en regeneración para su posterior uso. La operación consiste en el ingreso del fluido a tratar por la parte superior del primer tamiz, mientras que el segundo se está regenerando.

Se recomienda un ingreso de alimento por la parte superior debido a que cuando se usa flujo ascendente hay posibilidades de fluidización, es decir que la corriente líquida o gaseosa llega a suspender las partículas sólidas, y el material adsorbente puede llegar a comportarse también como un fluido, esto puede provocar colisiones y pérdida de finos dentro del tamiz. Dependiendo de la concentración a la que se desea obtener del producto, una vez que comience a tener una concentración menor a aquella, se procederá al cambio automático de válvulas para que el alimento ingrese al segundo tamiz, mientras que el primero se regenera. [14]

Las dimensiones del lecho están en función de la cantidad a tratar, la velocidad del gas y el tiempo de duración del ciclo de adsorción. La sección transversal del lecho es dada acorde a una velocidad superficial recomendada en el rango de 0,15-0,45 m/s con el fin de obtener una caída de presión muy mínima por pie de lecho.

La longitud del lecho y velocidad de la alimentación se eligen para ciclo que va de 2 a 24 horas, en caso de obtener un lecho de mayor longitud entonces se tendrá así mismo un mayor tiempo de duración del ciclo, pero si son

demasiado grandes los lechos ocasionará una mayor caída de presión; es recomendado usar lechos de longitud de 30 cm con el fin de obtener una baja caída de presión, pero el inconveniente está en que al tener poca longitud no se producirá una completa separación de los componentes y a su vez se requeriría consumir mayor energía para el proceso de regeneración. [14]

2.4.2. Regeneración

El proceso de regeneración se puede realizar por medio del ingreso de un gas inerte a alta temperatura, acorde a la temperatura que pueda soportar el adsorbente. Otro método común es el ingresar vapor de agua, siempre y cuando el solvente no sea miscible en agua, al tener contacto con el lecho aumenta la temperatura del sólido adsorbente, y por ende provoca la desorción con esta energía brindada por el vapor y por último se procede al secado del lecho con un gas inerte.

2.4.3. Secado de gases

El proceso dedicado al secado de gases es muy similar al descrito anteriormente, en donde la regeneración es utilizando gas caliente, mientras que el gas húmedo que sale del lecho regenerado se lo puede descargar al ambiente o recuperar en un condensador recirculando el gas que pasa por un un proceso de calefacción.

La regeneración se la puede realizar a una presión menor que la utilizada para la adsorción, ya que el vacío ayuda al proceso de desorción.[14]

2.5. Zeolitas

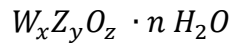
Las zeolitas naturales constituyen a un gran grupo de minerales, son aluminosilicatos (Aluminio, silicio, hidrógeno y oxígeno) hidratados, que proceden principalmente de la transformación de cenizas volcánicas, aunque también yacen en rocas sedimentarias y metamórficas. Este mineral se caracteriza por su porosidad y su facilidad de absorber las moléculas de agua, existen diversos tipos de zeolitas naturales, todas tienen una estructura muy similar entre sí pero difieren en el tamaño del poro y su capacidad de intercambio iónico.

2.5.1. Tipos de zeolitas

Entre las Zeolitas Naturales más conocidas tenemos:

- Mordenita
- Clinoptilolita
- Ferrierita
- Analcima
- Erionita
- Chabazita
- Leucita

La Zeolita puede tener la siguiente fórmula determinada experimentalmente
[16]



W= Metales como Ca, Na y en menos proporción (K, Ba, Sr)

Z= Corresponde a (Al+Si)

Por ejemplo la Leucita: $K(Si_2Al) O_6$.



Figura 8. Zeolitas naturales.

Fuente: Somez, n.d. Disponible en:
<http://somez.fr/es/faq>

Existe también en la industria zeolitas que son fabricadas sintéticamente, también conocidas como tamices moleculares, se conoce que la primera zeolita que ha sido creada sintéticamente fue en 1950 en Estados Unidos, por Linde de Union Carbide Corporation, con el fin de utilizarla como intercambiador iónico, con posterior uso en catalizadores y adsorbentes.[17]

Estas zeolitas se producen a partir de soluciones acuosas saturadas, y depende del tiempo de cristalización, las condiciones de operación de las mismas como agitación en el momento de cristalización o de forma estática.

De esta manera se obtienen los diferentes tipos de zeolitas sintéticas como (A, X, Y, P)[17].



Figura 9. Zeolitas sintéticas.

Fuente: (Alibaba, n.d). Disponible en:
<http://m.alibaba.com/product/60160825836/-Bead-Anti-Moisture-Drying-Agent/specifications.html>

2.5.2. Estructura de la zeolita

La estructura de la zeolita, como su nombre lo indica; aluminosilicatos, significa que se compone de AlO_4 y SiO_4 , aquí cada oxígeno comparte su enlace entre dos tetraedros, estos hacen que se forme una red tridimensional, por consiguiente, quedan grandes espacios abiertos en su estructura, que dan lugar a canales, los cuales permiten que iones y moléculas tengan facilidad de movimiento. Esta es una capacidad que permite a la zeolita cumplir la función de tamiz molecular. [18]

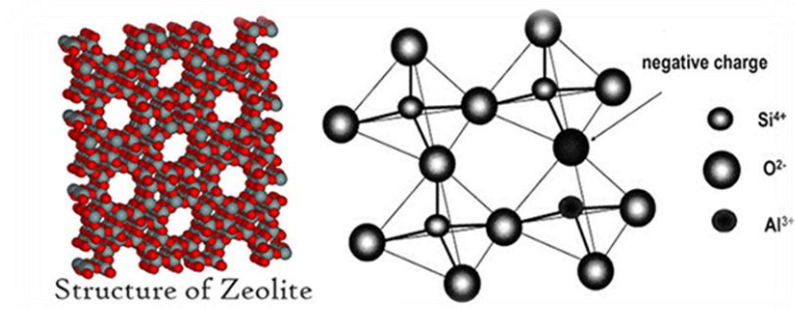


Figura 10.. Estructura de la Zeolita.

Fuente: (Gordes Zeolite,2013). Disponible en:
<http://www.gordeszeolite.com/zeolite--clinoptilolite->

Una propiedad también importante de la zeolita es que es uno de los pocos minerales que se encuentra cargado negativamente en la naturaleza, por ello para equilibrar esta carga se une a metales de uno o dos átomos de valencia tales como; Na⁺, K⁺, Mg⁺² y Ca⁺². [19]

2.5.3. Usos y aplicaciones

La zeolita tiene diferentes usos y aplicaciones, tales como [20]:



Figura 11. Usos y aplicaciones de la Zeolita.

Elaborado por: (Pactong, Solange; Salinas, David)

CAPÍTULO 3

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN.

Para llevar a cabo el diseño y construcción del sistema se tomó en cuenta los siguientes aspectos:

- Seleccionar el tipo de tamiz molecular adecuado a utilizar, tomando en cuenta el tamaño del poro y su capacidad de adsorción.
- La temperatura del vapor alcohólico que entra al tamiz molecular debe estar entre 100-120°C, para ello se necesitó diseñar un intercambiador de calor que cumpla la función de supercalentador, así como también se requirió el diseño de un condensador para llevar a estado líquido el vapor de alcohol que se obtiene del tamiz molecular.
- Para que el alcohol pueda alcanzar temperaturas mayores a 100°C, la caldera debe operar a 50 psi (g).
- Para la regeneración del filtro molecular, se requiere de alcohol anhidro.

El tamiz molecular más apropiado para romper el azeótropo es la Zeolita Sintética 3 A, ya que el tamaño de la molécula de agua es de 0.25×10^{-9} m y este tipo de Zeolita puede retener moléculas con tamaño de hasta 0.32×10^{-9} m, por lo tanto la molécula de alcohol pasaría a través de la zeolita ya que su tamaño es de 0.4×10^{-9} m; pero que favorezca su adsorción es necesario llevar el proceso en fase vapor.

A continuación se muestran los cálculos empleados para el diseño de los diferentes equipos.

3.1. CÁLCULOS EMPLEADOS PARA EL DISEÑO DEL CALENTADOR

3.1.1. INTERCAMBIADOR DE CALOR (SUPERHEAT)

La labor del calentador será la de pasar a la mezcla etanol-agua de fase líquida a fase vapor a una temperatura de 120 °C, por lo que se necesita energía de calor sensible para la fase líquida, energía de calor latente para vaporizar la mezcla, y energía de calor sensible para aumentar de temperatura a la fase vapor. Debido a esto se eligió un flujo de proceso bajo, ya que el fin del equipo es demostrar a escala piloto la adsorción de agua y no es necesario utilizar grandes flujos que para ese caso se necesitaría una mayor área de transferencia de calor. Para tratar una alimentación como mínima de 14 litros y que la práctica tenga una duración aproximada de 20 minutos en adelante se eligió un caudal de 0.2 gpm.

- Conversión a flujo másico:

$$\begin{aligned} \text{Flujo volumétrico}_{\text{etanol}} &= 0.20 \frac{\text{gal mezcla}}{\text{min}} \times \frac{94 \text{ gal etanol}}{100 \text{ gal mezcla}} \\ &= 0.19 \text{ gpm etanol} \end{aligned}$$

$$\text{Flujo volumétrico}_{\text{agua}} = 0.20 \frac{\text{gal mezcla}}{\text{min}} - \frac{0.19 \text{ gal etanol}}{\text{gal mezcla}} = 0.01 \text{ gpm agua}$$

- La concentración elegida de la mezcla es de 94% v/v, transformando a % másico tenemos:

$$\begin{aligned} \text{Flujo másico}_{\text{etanol}} &= 0.19 \frac{\text{gal}}{\text{min}} \times \frac{60 \text{ min}}{\text{h}} \times \frac{0.003785 \text{ m}^3}{\text{gal}} \times \frac{789.7 \text{ Kg}}{\text{m}^3} \times \frac{2.2 \text{ lb}}{\text{Kg}} \\ &= 74.96 \frac{\text{lb}}{\text{h}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Flujo másico}_{\text{agua}} &= 0.01 \frac{\text{gal}}{\text{min}} \times \frac{60 \text{ min}}{\text{h}} \times \frac{0.003785 \text{ m}^3}{\text{gal}} \times \frac{1000 \text{ Kg}}{\text{m}^3} \times \frac{2.2 \text{ lb}}{\text{Kg}} \\ &= 4.99 \frac{\text{lb}}{\text{h}} \end{aligned}$$

$$\text{Flujo másico}_{\text{mezcla}} = 74.96 \frac{\text{lb}}{\text{h}} + 4.99 \frac{\text{lb}}{\text{h}} = 79.96 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$$

$$\% \text{ Flujo Másico}_{\text{etanol}} = \frac{74.96 \frac{\text{lb etanol}}{\text{h}}}{79.96 \frac{\text{lb mezcla}}{\text{h}}} \times 100 = 93.75 \%$$

$$\% \text{ Flujo Másico}_{\text{agua}} = \frac{4.99 \frac{\text{lb etanol}}{\text{h}}}{79.96 \frac{\text{lb mezcla}}{\text{h}}} \times 100 = 6.25 \%$$

Acorde a la tabla de coeficientes totales para diseño disponibles en el libro de Transferencia de Calor de Donald Kern tenemos un rango de U_D : $50 < U_D < 100$

$$\frac{BTU}{h \text{ pies}^2 \text{ } ^\circ F}$$

La ecuación de la ley fundamental de transferencia de calor, nos permite saber qué ocurriría con el área utilizando los valores extremos de U_D recomendado:

$$Q = A_o \times MLDT \times U_D \quad (\text{Ecuación 1})$$

(Heberto Tapia García, 2005)

Donde:

Q = Flujo de calor transferido, BTU/h.

A_o = área de transferencia de calor, pies².

$MLDT$ = Diferencia logarítmica media de temperatura, ⁰ F.

U_D = Coeficiente global de transferencia de calor de diseño, $\frac{BTU}{h \text{ pies}^2 \text{ } ^\circ F}$.

$$A_o = \frac{Q}{MLDT \times U_D}$$

Como se puede observar en la fórmula en la que se despeja el área de transferencia de calor, el U_D es inversamente proporcional al área, por lo que al realizar el cálculo con un U_D máximo recomendado se obtendría un área de transferencia mínimo; mientras que al utilizar un U_D mínimo se obtendría un

área de transferencia máximo, es por esta razón que escogimos un valor medio en el rango de la recomendación.

Para U_D se eligió un valor promedio para el dimensionamiento:

$$U_D = 75 \frac{BTU}{h \text{ pies}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$$

Datos termodinámicos del vapor a 50 psig:

$$T_s = 297.97 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$\lambda_v = 911.6 \frac{BTU}{lb}$$

Propiedades del etanol a temperatura media de cada fase:

$$Cp_{etanol \text{ líquido}} = 0.58 \frac{BTU}{lb \text{ } ^\circ\text{F}}$$

$$Cp_{etanol \text{ vapor}} = 0.78 \frac{BTU}{lb \text{ } ^\circ\text{F}}$$

$$\lambda_{etanol} = 361.56 \frac{BTU}{lb}$$

3.1.2. Cálculo de flujo másico de vapor necesario:

Balance de energía:

$$M_v \lambda_v = (F_{mezcla}) \times [(Cp_{etanol \text{ líquido}} \times \Delta T_{2-1}) + \lambda_{et} + (Cp_{etanol \text{ vapor}} \times \Delta T_{3-2})]$$

(Ecuación 2)

Donde:

M_v = Flujo másico de vapor, lb/h.

F mezcla= Flujo de alimentación de la mezcla etanol-agua, lb/h.

λ_v = Calor latente de vaporización, BTU/lb.

λ_{et} = Calor latente de vaporización del etanol, BTU/lb.

C_p etanol vapor= Calor específico a presión cte. en fase vapor del etanol, BTU/lb ° F.

C_p etanol líquido= Calor específico a presión cte. en fase líquida del etanol, BTU/lb ° F.

ΔT_{2-1} = Diferencia de temperatura entre la temperatura de ebullición y la temperatura de entrada del etanol, ° F.

ΔT_{3-2} = Diferencia de temperatura entre la temperatura de salida requerida y la temperatura de ebullición del etanol, ° F.

Despejando de la ecuación 2 la masa de vapor (M_v):

$$M_v = \frac{(F_{mezcla}) \times [(C_{p_{etanol\ líquido}} \times \Delta T) + \lambda_{et} + (C_{p_{etanol\ vapor}} \times \Delta T_{3-2})]}{\lambda_v}$$

$$M_v = \frac{(79.96 \frac{lb}{h}) \times [(0.58 \frac{BTU}{lb \cdot ^\circ F} \times (173.12 - 77)^\circ F) + 361.56 \frac{BTU}{lb} + (0.78 \frac{BTU}{lb \cdot ^\circ F} \times (248 - 173.12)^\circ F)]}{911.6 \frac{BTU}{lb}}$$

$$M_v = 41.73 \frac{lb}{h}$$

El valor obtenido de 41.73 lb/h es el vapor requerido para la operación.

Tomando en cuenta el título de vapor obtenido en prácticas de laboratorio ($x=0.93$), se calcula el flujo real de vapor proveniente de la caldera necesario para la operación.

$$\text{Flujo real de vapor} = \frac{100 \text{ lb de flujo}}{93 \text{ lb de vapor}} \times 41.73 \frac{\text{lb de vapor}}{h}$$

$$\text{Flujo real de vapor} = 44.87 \frac{lb}{h}$$

La caldera dispone de 15 BHP, dato con el cual podemos calcular el flujo de vapor que puede producir y teniendo como dato de prácticas de laboratorio que la eficiencia de la caldera es de 70%:

$$15 \text{ BHP} \times \frac{34.5 \text{ lbs vapor}}{1 \text{ BHP}} \times 0.70 = 362.25 \text{ lbs} \frac{\text{vapor}}{\text{hora}}$$

Analizando en cambio el caso de que se usen los dos equipos con mayor consumo de vapor que se encuentran en el LOPU, que en este caso son el intercambiador de calor de tubos concéntricos y el evaporador, con consumos

de vapor aproximadamente de 170 lb/h y 160 lb/h respectivamente, dan lugar a un consumo de 330 lb/h, este valor se puede comparar con el total que puede producir la caldera de 362.25 lb/h, entonces solo quedarían disponibles 32.25 lb/h lo cual no abastecería a nuestro equipo, entonces es recomendable usar el equipo cuando no estén en uso los demás, al menos los de mayor consumo de vapor.

El flujo de vapor brindado por el caldero es mucho mayor que el requerido por el intercambiador de calor perteneciente a nuestro sistema, por lo que no se tendría ningún inconveniente al realizar una práctica usando solamente nuestro equipo, forma en la cual nosotros procedimos a trabajar.

Entonces:

Vapor disponible > Vapor requerido, por lo tanto, si se cuenta con el suficiente flujo para llevar la operación en marcha.

$$MLDT = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (\text{Ecuación 3}) \quad (\text{Heberto Tapia García, 2005})$$

Donde:

MLDT= Diferencia logarítmica media de temperatura, ° F.

ΔT_2 = Terminal caliente, °F.

$\Delta T1 = \text{Terminal frío, } ^\circ\text{F}.$

$$\Delta T2 = 297.97 \text{ } ^\circ\text{F} - 77^\circ\text{F}$$

$$\Delta T2 = 220.97 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$\Delta T1 = 297.97 \text{ } ^\circ\text{F} - 248^\circ\text{F}$$

$$\Delta T1 = 49.97 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$MLDT = \frac{220.97 \text{ } ^\circ\text{F} - 49.97 \text{ } ^\circ\text{F}}{\text{Ln}\left(\frac{220.97 \text{ } ^\circ\text{F}}{49.97 \text{ } ^\circ\text{F}}\right)}$$

$$MLDT = 115.03 \text{ } ^\circ\text{F}$$

El calor que brinda el vapor a la mezcla de etanol-agua se la calcula por medio de la masa de vapor requerida por su calor latente:

$$Q = M_v \times \lambda_v \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$Q = 41.73 \frac{\text{lb}}{\text{h}} \times 911.6 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}}$$

$$Q = 38038.25 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

Utilizando la ecuación de la ley fundamental de transferencia de calor, obtenemos el área de transferencia de calor (ecuación 1).

$$Q = A_o \times MLDT \times U_D$$

$$A_o = \frac{Q}{MLDT \times U_D}$$

$$A_o = \frac{38038.25 \frac{BTU}{h}}{115.03 \text{ } ^\circ\text{F} \times 75 \frac{BTU}{h \text{ pies}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}}$$

$$A_o \text{ requerida} = 4.41 \text{ pies}^2$$

3.1.3. Área de transferencia de calor del intercambiador adquirido

Los tubos cuentan con dimensiones de diámetro=0.033 pies (1 cm) y una longitud total de 4.20 pies (128 cm).

$$A_o = \# \text{ tubos} \times 2 \times \pi \times \frac{d}{2} \times h \quad (\text{Ecuación 5})$$

(Heberto Tapia García, 2005)

$$A_o = 15 \text{ tubos} \times 2 \times \pi \times \frac{0.033 \text{ pies}}{2} \times 4.20 \text{ pies}$$

$$A_o \text{ disponible} = 6.53 \text{ pies}^2$$

$$A_o \text{ disponible} > A_o \text{ requerida}$$

Por lo tanto, el área que dispone el intercambiador, indica que teóricamente es capaz de llevar al flujo de alimentación hasta la temperatura requerida.

3.2. TAMIZ MOLECULAR

El caudal del proceso es de 0.2 gpm (1.60 pies³/h) y el diámetro del tamiz elegido es de 6 pulgadas (0.5 pies), la explicación de la elección del diámetro se la explica en la tabla 5.

Para saber si tanto el caudal, como el diámetro fueron elegidos correctamente, es necesario calcular la caída de presión por medio de la ecuación modificada de Ergun usando la velocidad superficial del fluido en el tamiz:

3.2.1 Cálculo de velocidad superficial en el tamiz:

$$Q' = V \times A \quad (\text{Ecuación 6})$$

(Gas Processors Suppliers Association, 2004)

Donde.

Q'= Caudal de la mezcla etanol agua de alimentación, pies³/min.

V= Velocidad superficial, pies/min.

A= Área transversal del lecho, pies².

Despejando la velocidad superficial de la ecuación 6:

$$V = \frac{Q'}{A}$$

$$V = \frac{1.60 \frac{\text{pies}^3}{\text{h}} \times \frac{\text{h}}{60 \text{ min}}}{\pi \times \frac{(0.5 \text{ pies})^2}{4}}$$

$$V = 0.136 \frac{\text{pies}}{\text{min}}$$

3.2.2 Cálculo de caída de presión por longitud de lecho:

$$\frac{\Delta P}{L} = BuV + C\rho V^2 \quad (\text{Ecuación 7})$$

(Gas Processors Suppliers Association, 2004)

Donde:

ΔP = caída de presión; psi

u = viscosidad dinámica, cp.

ρ = densidad; lb/ft³

V = Velocidad superficial del vapor, ft/min

L = longitud del lecho empacado, pies

Tabla 3. Constante acorde al tipo de partícula

Tipo de partícula	B	C
1/8" Esférico (4X8 malla)	0.0560	0.0000889
1/8" Extrusado	0.0722	0.000124
1/16" Esférico (8x12 malla)	0.152	0.000136
1/16" Extrusado	0.238	0.000210

Tabla 4. Propiedades del etanol a temperatura media

Propiedades	Valor	Unidad
u= viscosidad	0.012	cp
ρ= densidad	0.375	lb/ft ³

Reemplazando los datos en la ecuación 7:

$$\frac{\Delta P}{L} = 0.0560 \times 0.012 \times 0.1362 + 0.0000889 \times 0.375 \times (0.1362)^2$$

$$\frac{\Delta P}{L} = 0.000092 \frac{psi}{pies}$$

La caída de presión es mínima, por lo cual se confirma que el haber definido un caudal y el diámetro no afectará al proceso en el tamiz.

3.2.3 Cálculo de la cantidad de zeolita necesaria para el proceso de adsorción:

$$S_s = \frac{W_r}{(0.21)(C_{SS})(C_T)} \quad (\text{Ecuación 8})$$

(Gas Processors Suppliers Association, 2004)

Donde:

W_r = Agua a remover por ciclo, lb

C_{SS} = Factor de corrección de la saturación del tamiz

C_T = Factor de corrección de temperatura.

S_s = Libras de tamiz molecular necesario.

Se considera que el ciclo terminará una vez que se procese los 14 litros de alimentación a una concentración del 94% v/v.

El factor de 0.21 viene dado por la capacidad de adsorción de agua de la zeolita 3A utilizada.

Cálculo de cantidad de agua a retirar por ciclo:

$$W_r = V_m \times X_A \times \rho_A \quad (\text{Ecuación 9})$$

(Gas Processors Suppliers Association, 2004)

Donde:

V_m = Volumen de la mezcla, m^3 .

X_A = Concentración de agua en la mezcla.

ρ_A = Densidad del agua, Kg/m^3

Reemplazando en la ecuación 9:

$$W_r = 0.014 m^3 \times 0.06 \times 1000 \frac{Kg}{m^3} \times \frac{2.2 lb}{Kg}$$

$$W_r = 1.85 lb$$

La cantidad a remover de agua del total de la alimentación de la mezcla etanol-agua es de 1.85 lb. El factor de corrección de saturación del tamiz y el factor por corrección de temperatura se los localiza en las gráficas siguientes:

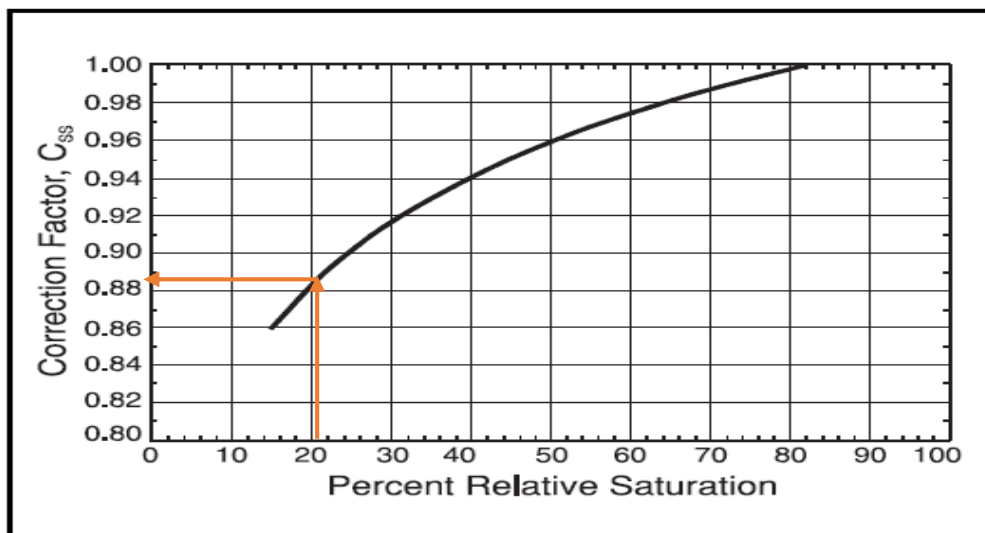


Figura 12. Factor de corrección de saturación del tamiz molecular.
Fuente: (Gas Processors Suppliers Association. 2004).

El factor de corrección de saturación del tamiz es de 0.885. La temperatura a la que estará en operación el tamiz es de 120 ° C (248 ° F), por lo que al observar en la gráfica no están visibles estos valores, por lo que será necesario calcular la ecuación de la recta que rige la curva de la gráfica

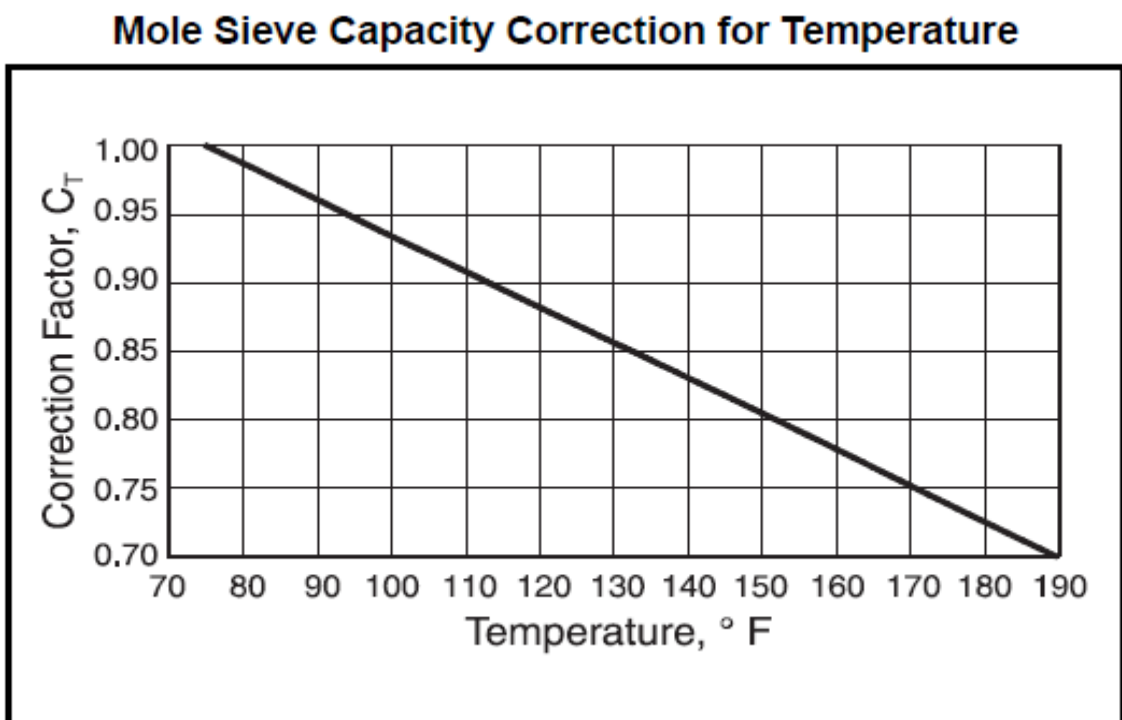


Figura 13. Corrección de la capacidad del tamiz molecular por temperatura.

Fuente: (Gas Processors Suppliers Association, 2004)

$$C_T = m \times T + b \quad (\text{Ecuación 10})$$

(Gas Processors Suppliers Association, 2004)

$$m = \frac{C_{T2} - C_{T1}}{T_2 - T_1}$$

$$m = \frac{0.75 - 0.95}{170 - 94}$$

$$m = -2.63 \times 10^{-3}$$

$$C_T = -2.63 \times 10^{-3} \times T + b$$

Para encontrar la intersección en el eje de C_T , se eligió un punto para reemplazarlo en la ecuación de la recta, $T = 188$ y $C_T = 0.70$

Despejando de la ecuación:

$$b = 2.63 \times 10^{-3} \times T + C_T$$

$$b = 2.63 \times 10^{-3} \times 188 + 0.70$$

$$b = 1.19$$

$$C_T = -2.63 \times 10^{-3} \times T + 1.19$$

Para la temperatura de 248° F:

$$C_T = -2.63 \times 10^{-3} \times 248 + 1.19$$

$$C_T = 0.54$$

Reemplazando en la ecuación 8:

$$S_s = \frac{1.85 \text{ lb agua}}{\left(0.21 \frac{\text{lb agua}}{\text{lb de zeolita}}\right) (0.885)(0.54)}$$

$$S_s = 18.43 \text{ lb de zeolita}$$

3.2.4 Cálculo de la longitud de saturación:

$$L_s = \frac{4S_s}{\pi(D^2)(Bulk\ density)} \quad (\text{Ecuación 11})$$

(Gas Processors Suppliers Association, 2004)

Donde:

Ls= Longitud de saturación del lecho, pies.

Ss= Cantidad de zeolita requerida, lb.

Bulk density= Densidad de los beads, lb/pies³.

D= Diámetro del tamiz molecular, pies.

$$L_s = \frac{4 \times 18.43 \text{ lb de zeolita}}{\pi(0.5 \text{ pies})^2 \left(50 \frac{\text{lb}}{\text{pies}^3}\right)}$$

$$L_s = 1.88 \text{ pies}$$

3.2.5 Cálculo de la longitud de zona de transferencia:

$$L_{MTZ} = \left(\frac{V}{35}\right)^{0.3} (Z) \quad (\text{Ecuación 11})$$

(Gas Processors Suppliers Association, 2004)

Donde Z es:

1.70 ft para 1/8 in de bead

0.85 ft para 1/16 in de bead

$$L_{MTZ} = \left(\frac{0.136 \frac{\text{pies}}{\text{min}}}{35}\right)^{0.3} (1.70 \text{ pies})$$

$$L_{MTZ} = 0.32 \text{ pies}$$

$$L_T = 1.88 \text{ pies} + 0.32 \text{ pies} = 2.2 \text{ pies}$$

En caso de haber escogido un diámetro de 4 o de 8 pulgadas, realizando los respectivos cálculos, la altura del lecho hubiera quedado de la siguiente forma:

Tabla 5. Longitud del lecho a diferentes diámetros.

Diámetro (pulgadas)	Longitud de lecho sin considerar espacios y cerámica (pies)	Longitud de lecho sin considerar espacios y cerámica (cm)
4	4,72	143,87
6	2,2	67,05
8	1,35	41,15

Se puede observar que en el caso del diámetro de 4 pulgadas la longitud del lecho sin tomar en cuenta el espacio necesario que incluye la cerámica y el espacio vacío en sus extremos, es de 4,72 pies (143,87 cm), lo cual consideramos que es demasiado grande para un diámetro tan pequeño. Por otro lado, en el caso opuesto con el diámetro de 8 pulgadas queda una longitud de 1,35 pies (41 cm), situación en la que se cuenta con un diámetro demasiado grande para una longitud relativamente pequeña.

Es por esta razón que consideramos apropiado dejarlo con un diámetro de 6 pulgadas, ya que el diseño es adecuado para el espacio que disponemos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

3.2.2. INTERCAMBIADOR DE CALOR (CONDENSADOR)

La concentración elegida de la mezcla es de 94% v/v, transformando a % másico tenemos:

$$\text{Flujo másico}_{\text{etanol}} = 74.96 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$$

$$\text{Flujo másico}_{\text{agua}} = 4.99 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$$

$$\text{Flujo másico}_{\text{mezcla}} = 74.96 \frac{\text{lb}}{\text{h}} + 4.99 \frac{\text{lb}}{\text{h}} = 79.96 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$$

$$\% \text{ Flujo Másico}_{\text{etanol}} = 93.75 \%$$

$$\% \text{ Flujo Másico}_{\text{agua}} = 6.25 \%$$

Acorde a la tabla de coeficientes totales para diseño disponibles en el libro de Donald Kern, para enfriadores con fluido caliente como sustancias orgánicas ligeras y fluido frío el agua, tenemos un rango de U_D : $75 < U_D < 150 \frac{\text{BTU}}{\text{h pies}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$.

Para U_D se eligió un valor promedio para el dimensionamiento:

$$U_D = 112.5 \frac{\text{BTU}}{\text{h pies}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$$

Datos termodinámicos del agua:

La temperatura de entrada del agua es de 25 ° C (77 ° F) y se restringirá la temperatura del agua de salida a 65 ° C (149 ° F); para escoger el calor específico a una temperatura determinada elegimos a temperatura media de cada fase.

Tabla 6. Propiedades a utilizar en los cálculos

Propiedades	Valor	Unidad
$C_{p_{\text{agua}}}$ = Calor específico del agua.	0.99	$\frac{BTU}{lb \text{ } ^\circ F}$
$C_{p_{\text{etanol líquido}}}$ = Calor específico del etanol líquido.	0.58	$\frac{BTU}{lb \text{ } ^\circ F}$
$C_{p_{\text{etanol vapor}}}$ = Calor específico del vapor de etanol.	0.78	$\frac{BTU}{lb \text{ } ^\circ F}$
λ_{etanol} = Calor latente de vaporización del etanol.	361.56	$\frac{BTU}{lb}$

Balance de energía:

$$M_a C_{p_{\text{agua}}} \Delta T = (F_{\text{mezcla}}) \times [(C_{p_{\text{etanol líquido}}} \times \Delta T_{2-1}) + \lambda_{\text{et}} + (C_{p_{\text{etanol vapor}}} \times \Delta T_{3-2})]$$

La temperatura de salida de la mezcla etanol-agua para facilidades de medición será de 60 ° C (140 ° F).

Cálculo de flujo másico de agua necesario:

$$M_a = \frac{(F_{mezcla}) \times [(Cp_{etanol\ líquido} \times \Delta T) + \lambda_{et} + (Cp_{etanol\ vapor} \times \Delta T_{3-2})]}{Cp_{agua} \Delta T}$$

$$M_a = \frac{(79.96 \frac{lb}{h}) \times [(0.58 \frac{BTU}{lb \cdot ^\circ F} \times (173.12 - 140)^\circ F) + 361.56 \frac{BTU}{lb} + (0.78 \frac{BTU}{lb \cdot ^\circ F} \times (248 - 173.12)^\circ F)]}{(0.99 \frac{BTU}{lb \cdot ^\circ F}) (149 - 77)^\circ F}$$

$$M_a = 492.66 \frac{lb}{h}$$

El valor obtenido de 492.66 lb/h es el flujo de agua requerido para poder enfriar el etanol. El flujo de agua disponible en la red pública es de aproximadamente 800 lb/h.

Entonces:

Flujo de agua disponible > Flujo de agua requerido, por lo tanto, si se cuenta con el suficiente flujo de agua para poder enfriar en el intercambiador de calor.

La diferencia media logarítmica de temperatura por medio de los terminales calientes y fríos se lo obtiene por medio de:

$$MLDT = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{Ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)}$$

ΔT_2 = Terminal caliente

$$\Delta T1 = \text{Terminal frío}$$

$$\Delta T2 = 248\text{ °F} - 149\text{ °F}$$

$$\Delta T2 = 99\text{ °F}$$

$$\Delta T1 = 140\text{ °F} - 77\text{ °F}$$

$$\Delta T1 = 63\text{ °F}$$

$$MLDT = \frac{99\text{ °F} - 63\text{ °F}}{\ln\left(\frac{99\text{ °F}}{63\text{ °F}}\right)}$$

$$MLDT = 79.65\text{ °F}$$

El calor ganado por el agua se lo obtiene por:

$$Q = M_a \times C_{p\text{ agua}} \times \Delta T \quad (\text{Ecuación 11})$$

(Engineering Data Book, Oklahoma. 2004)

$$Q = 492.66 \frac{\text{lb}}{\text{h}} \times 0.99 \frac{\text{BTU}}{\text{lb °F}} \times (149 - 77)\text{ °F}$$

$$Q = 35116.80 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

$$Q = A_o \times MLDT \times U_D$$

$$A_o = \frac{Q}{MLDT \times U_D}$$

$$A_o = \frac{35116.80 \frac{BTU}{h}}{79.65^\circ F \times 112.5 \frac{BTU}{h \text{ pies}^2 \text{ }^\circ F}}$$

$$A_o \text{ requerida} = 3.91 \text{ pies}^2$$

Área de transferencia de calor del intercambiador adquirido:

Los tubos cuentan con dimensiones de diámetro=0.033 pies (1 cm) y una longitud total de 4.20 pies (128 cm).

$$A_o = \# \text{ tubos} \times 2 \times \pi \times \frac{d}{2} \times h$$

$$A_o = 15 \text{ tubos} \times 2 \times \pi \times \frac{0.033 \text{ pies}}{2} \times 2.56 \text{ pies}$$

$$A_o \text{ disponible} = 3.98 \text{ pies}^2$$

$A_o \text{ disponible} > A_o \text{ requerida}$

Por lo tanto, el área que dispone el intercambiador, indica que teóricamente es capaz de llevar de fase vapor de la mezcla etanol-agua a fase líquida a una

temperatura de 60° C (140 ° F) o menor ya que el área disponible es mayor que la requerida.

3.3. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL EQUIPO DE DESHIDRATACIÓN.

Tabla 7. Condiciones de operación del sistema del sistema.

Concentración de alcohol de la alimentación	94°GL
Tiempo de recirculación	3 minutos
Flujo de alimentación	0.2 GPM
Temperatura de entrada al tamiz	112°C
Temperatura de salida del tamiz	78°C
Tiempo de operación	25-30 minutos
Tiempo de regeneración	15-20 minutos

3.4. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA Y MATERIALES ESCOGIDOS.

Nuestro sistema consta de 3 equipos fundamentales:

- Intercambiador de calor (Super Calentador)
- Tamiz molecular
- Condensador

Intercambiadores de Calor (Super Calentador y Condensador)

En el caso de los intercambiadores de calor; el calentador y condensador de acuerdo al diseño planteado se lograron acoplar a nuestro sistema haciendo

uso de dichos equipos que nos fueron donados, debido a que fueron usados anteriormente a nivel industrial, requirieron de un mantenimiento adecuado para rehabilitarlos con el fin de poder usarlos en nuestro sistema.

Tanto el calentador y el condensador tienen su carcasa de acero al carbón o también conocido como hierro negro de cédula 40, y su banco de tubos interiores son de cobre.

El acero al carbón es un material que tiende a formar fácilmente una capa de óxido, mientras que el cobre tiene como ventaja su conductividad térmica, lo cual es beneficioso para poder alcanzar la temperatura a usarse en el sistema.

Se manejará un flujo bajo de la mezcla etanol-agua por lo tanto consideramos que lo mejor era hacerlo pasar por el interior de los tubos de cobre; mientras que el vapor de agua se lo haría pasar por la carcasa.

Debido a que estos se encontraban sin uso desde hace un tiempo considerable, fue necesario hacerles un lavado con un desoxidante que contenía ácido fosfórico para eliminar los óxidos en la parte interior de la carcasa formando así fosfatos que se retiraban con lavados de agua a flujo continuo, mientras que también se aplicó un desengrasante ya que cuando se encontraba operativo en la industria, a los intercambiadores les hacían pasar aceite por la carcasa. No se utilizó un desoxidante con ácido fuerte para evitar que se desgaste las tuberías de cobre que se encuentran en su interior, ya que el cobre tiende a desgastarse rápido ante presencia de ácidos fuertes.

Para concluir la limpieza de la carcasa de los intercambiadores, se les hizo ingresar vapor a 40 psig proveniente de la caldera, para así terminar de retirar cualquier suciedad que se haya complicado su eliminación ante la limpieza química. Los tubos de cobre se encontraban con resto de sedimentos, y para su limpieza se utilizó un cepillo para tubos para poder limpiar toda la longitud del mismo, se hizo pasar agua por el interior para terminar de retirar el resto de sedimento. Luego de la limpieza, se procedió a la prueba hidrostática del banco de tubos para comprobar si se hallaba alguna fuga, se hizo pasar agua durante 20 minutos y no se reportó alguna anomalía, por lo que ya estaba apto para ser colocadas las bridas.



Figura 14. Colocación de accesorios para la prueba hidrostática.

Elaborado por: (Salinas, David; Pactong, Solange)

Los agujeros de las bridas por donde pasaban los pernos tenían rosca, por lo cual para evitar que a futuro por cuestiones de oxidación tanto del material de la brida y los pernos provoquen un atascamiento de los mismos, se realizó por medio de un taladro la modificación de estos agujeros para que pasen a ser pasantes, para que ahora el aseguramiento de los pernos sea con tuercas, anillos planos y de presión de inoxidable.

Como era de esperarse al abrir las bridas se dañaron los empaques, nos cercioramos de retirar todos los restos que se encontraban adheridos a las superficies para que el nuevo empaque que se colocó pueda sellar de mejor manera, se mandó a hacer empaques de material de asbesto que tiene las características de soportar altas temperaturas, mientras que, para un mejor sellado de las bridas y empaque, se utilizó silicona para alta temperatura.

Una vez terminado el mantenimiento, era importante realizar una prueba para saber la temperatura real a la que podía alcanzar la mezcla etanol-agua utilizando vapor de 50 psig en la carcasa y agua por los tubos interiores a un caudal parecido al que se manejaría la mezcla etanol-agua, probándolo en horizontal y en vertical:

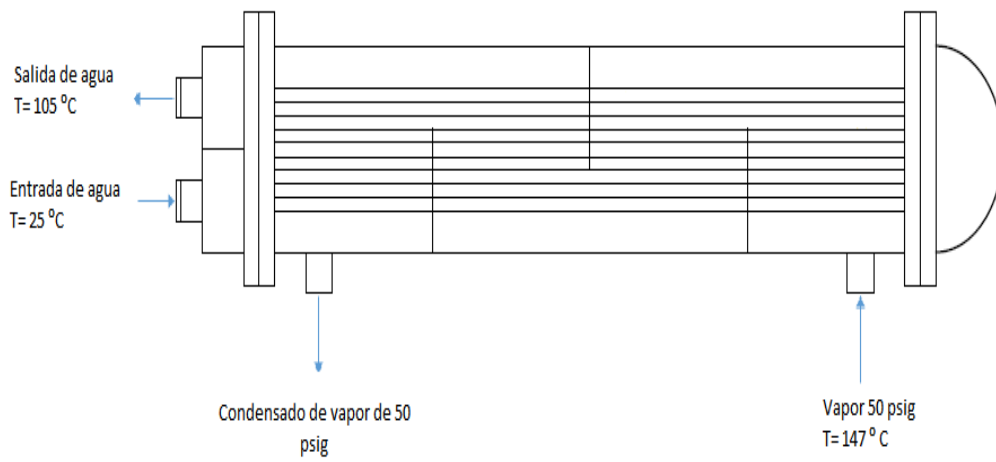


Figura 15. Prueba #1: Temperatura de salida del agua de 105 °C.

Elaborado por: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

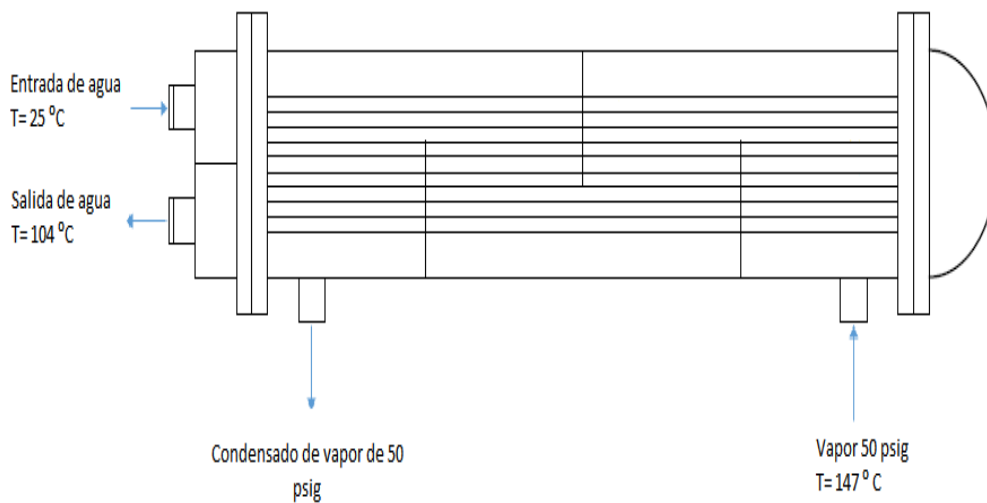


Figura 16. Prueba #2: Temperatura de salida del agua de 104 °C.

Elaborado por: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

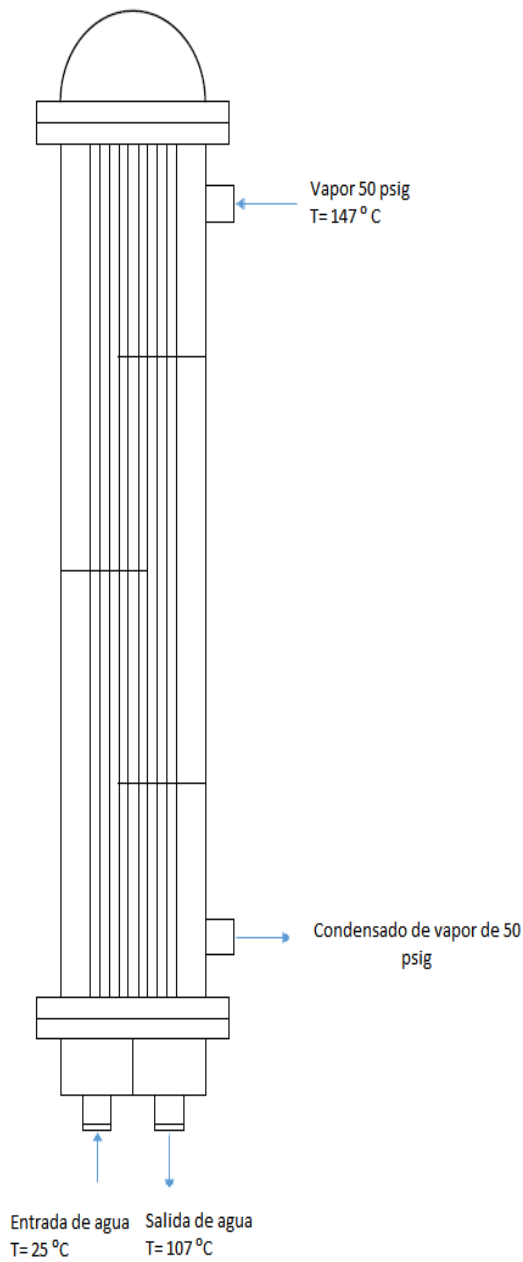


Figura 18. Prueba #3: Temperatura de salida del agua 107°C.

Elaborado por: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

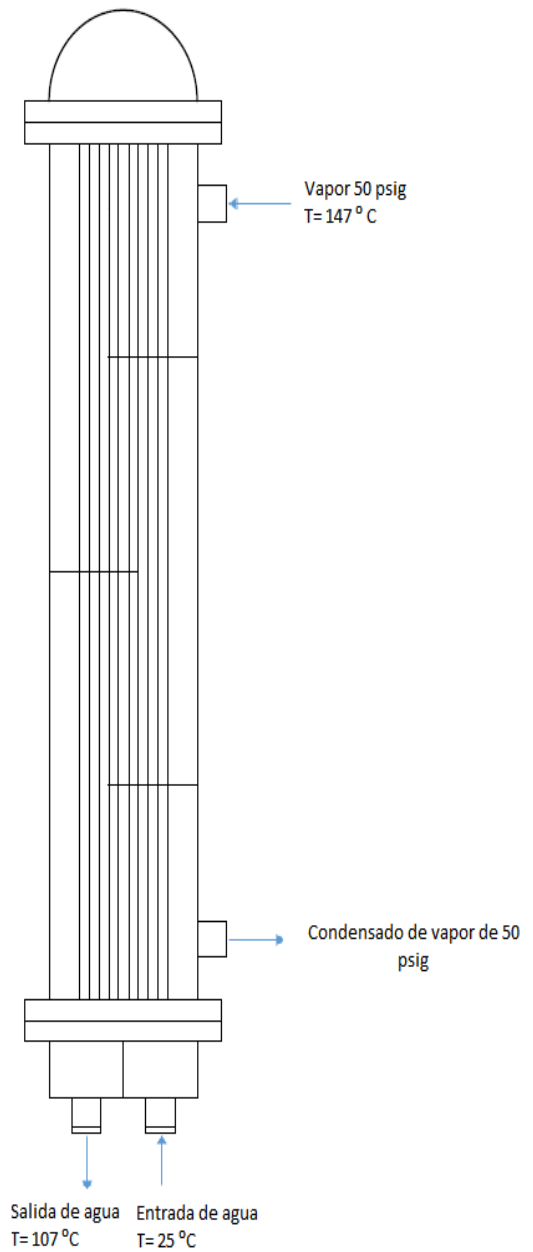


Figura 17. Prueba #4: Temperatura de salida del agua 107°C.

Elaborado por: (Pactong, Solange; Salinas, David.)



Figura 19. Sistema improvisado para probar el intercambiador de calor destinado a calentar la mezcla etanol-agua.

Elaborado por: Salinas, David; Pactong, Solange

Las pruebas realizadas indicaron cual era la mejor manera de usar el intercambiador, que en este caso se eligió utilizar el equipo como se presenta en la prueba #3. El etanol requiere menor energía en comparación al agua para subir su temperatura, entonces asumimos que cuando se use la mezcla etanol-agua llegaría a mayor temperatura tal y como sucedió.

Las dimensiones de los intercambiadores son muy similares, el diámetro y sus bridas son de las mismas dimensiones para ambos, lo que los diferencia es la longitud, el calentador tiene mayor área de transferencia en comparación al condensador; a continuación, se presentan de manera general las

dimensiones de los mismos en mm, encontrando de manera más detallada en los anexos:

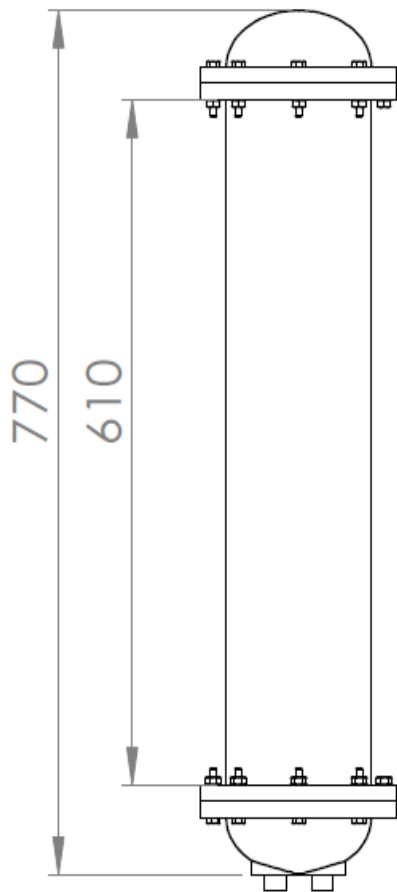


Figura 21. Dimensiones del calentador.

Elaborado por: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

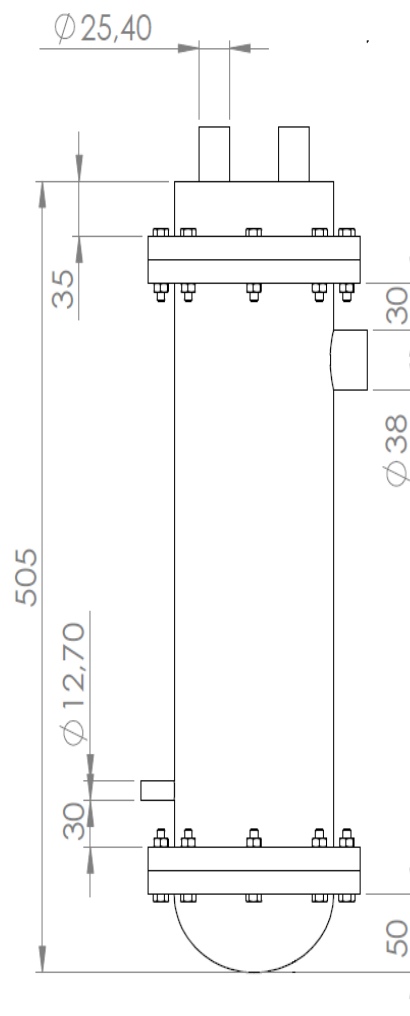


Figura 20. Dimensiones del condensado.

Elaborado por: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

3.4.2. TAMIZ MOLECULAR

Para la construcción del equipo principal de nuestro sistema; el tamiz molecular, se tomó como referencia los equipos de tamices moleculares disponibles en una empresa reconocida que nos brindó esta facilidad contemplando las siguientes consideraciones:

Utilizamos en la parte superior del tamiz unas esferas de cerámica de $\frac{1}{2}$ " con el fin de dar una mejor distribución del fluido y a su vez sirve como retención para altas velocidades superficiales para la regeneración en contra corriente, a nivel industrial se las usa para evitar que el choque constante del fluido dañe las partículas de zeolitas. Consideramos 2 cm adicionales (0.066 pies) para las cerámicas de $\frac{1}{2}$ " destinadas a cumplir la primera razón ya expuesta, ya que al ser un equipo a escala piloto no se manejará grandes flujos como a nivel industrial.

Para la parte inferior del tamiz, debido a que la malla que se encarga de soportar todo el lecho tiene un diámetro mayor al de la zeolita, se colocaron esferas de cerámicas de $\frac{1}{4}$ " para evitar la salida de las zeolitas por medio de la malla y también para dar una mejor distribución del fluido al ingresar en contracorriente para el proceso de regeneración; la altura destinada para este fin es de 1 cm (0.033 pies).

La longitud destinada para la zona inferior del lecho de zeolitas fue considerada una cantidad mínima de 2 cm (0.066 pies).

Para la zona tanto de ingreso como de salida del equipo, se consideró un espacio vacío equivalente a un 10 % de la zona del lecho con las cerámicas, destinado para la transición de velocidades superficiales por el cambio de diámetro, y también se lo implementó para colocar bridas tanto en la parte superior como inferior para cuando sea necesario desmontarlo, este brinde facilidades de desarmado.

$$\text{Espacio} = 0.10 \times 72 \text{ cm}$$

$$\text{Espacio} = 7.20 \text{ cm} = 0.24 \text{ pies}$$

Tabla 8. Distribución del interior del tamiz molecular.

	Longitud (pies)	Longitud (cm)
Espacio superior	0.24	7.2
Cerámicas ½"	0.066	2
Zona de saturación	1.88	57.30
Zona de transferencia de masa	0.32	9.75
Zona inferior de zeolita	0.066	2
Cerámicas ¼"	0.033	1
Espacio inferior	0.24	7.2
Longitud total del lecho	2.85	86.45

3.4.3. Montaje de la estructura y de equipos

La estructura se la colocó a lado de la unidad de destilación de lecho empacado, ya que a nivel industrial el tamiz molecular funciona como complemento para la unidad de destilación, en este caso no funcionarán al mismo tiempo de manera conjunta debido a que el flujo proveniente de la columna no es tan alto, pero no hay que descartar que a futuro se decida realizar la operación en conjunto con modificaciones para ambos equipos. El material que se utilizó para la estructura, fueron ángulos de hierro de dimensiones de 2x1/8" y recubiertos con pintura de color azul marino, se lo hizo de esta manera con el fin de que no haya contraste entre ambas estructuras.

Cuando ya se terminó la estructura se colocaron los equipos en sus respectivos sitios destinados para la operación, el calentador se lo colocó en la parte superior en vertical, el tamiz molecular en medio de la estructura y por último el condensador se decidió colocarlo en horizontal, ya que al salir el etanol del tamiz se encuentra en fase vapor y al ingresar al condensador ocupará la mayor parte de los tubos, viéndose innecesario que sea colocado en vertical.



Figura 22. Colocación de equipos.

Elaborado por: (Pactong, Solange;
Salinas, David.)



Figura 23. Estructura con los equipos montados.

Elaborado por: (Pactong, Solange;
Salinas, David.)

La línea de alimentación al proceso inicialmente es de material de PVC de ½" hasta poco antes de ingresar a la zona de la estructura para el proceso de deshidratación y por medio de una unión de PVC que tiene rosca metálica de un lado, se comienza la transición a acero inoxidable 312 de ½" para ingresar al calentador o también conocido a nivel industrial como súper heat.

Todas las líneas del proceso se hicieron de acero inoxidable ya que el alcohol es corrosivo y se desea tener un equipo que sea resistente para que tenga el menor mantenimiento posible y perdure para el beneficio de las promociones que hagan el uso del equipo como práctica de laboratorio. Las tuberías de acero inoxidable cuentan con un espesor de 2,77 mm, diámetro exterior nominal de 21.5 mm.

La línea de vapor fue hecha de hierro negro, y a la salida del calentador se puso un filtro en Y de acero inoxidable para evitar que la trampa de vapor se tape. Las válvulas que se usaron fueron de bronce, bronce cromado y acero inoxidable.

Se hizo un juego de válvulas para cambiar la configuración de deshidratación a regeneración con etanol anhidro.

Los medidores como termómetros y rotámetros se los colocaron al final para evitar algún roce que pueda dañarlos.



Figura 25. Sistema con líneas de proceso construidas.

Elaborado por: (Pactong, Solange; Salinas, David.)



Figura 24. Tamiz molecular con sus líneas para regeneración.

Elaborado por: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

La línea de vapor fue aislada térmicamente con cañuelas de lana de vidrio recubiertas con láminas de aluminio enroladas, y una vez que el sistema ya estuvo terminado se comenzaron a realizar las pruebas para así identificar la forma más idónea para manejar el sistema.



Figura 26. Líneas de vapor aisladas térmicamente.

Elaborado por: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

Se colocaron termómetros tanto a la entrada como a la salida del tamiz molecular, ya que la temperatura es una variable de proceso importante para favorecer la adsorción del agua de la mezcla etanol-agua.

La bomba de alimentación que se utilizó para el ingreso de la alimentación, fue la ya existente en el equipo de destilación de lecho empacado, se hizo una conexión en las tuberías para que trabaje o para el sistema de deshidratación o para el sistema de destilación. También se hizo una recirculación al tanque de alimentación, debido a que nuestro sistema trabaja con flujos relativamente

bajos en comparación a la capacidad de la bomba de ½ HP, la recirculación cumplirá la labor de evitar un forzamiento a la bomba.

El rotámetro cuenta con el rango de medición de 0.1 a 1 gpm y este dispone de una válvula para la manipulación del caudal.



Figura 27. Rotámetro.

Elaborado por: (Pactong, Solange;
Salinas, David.)

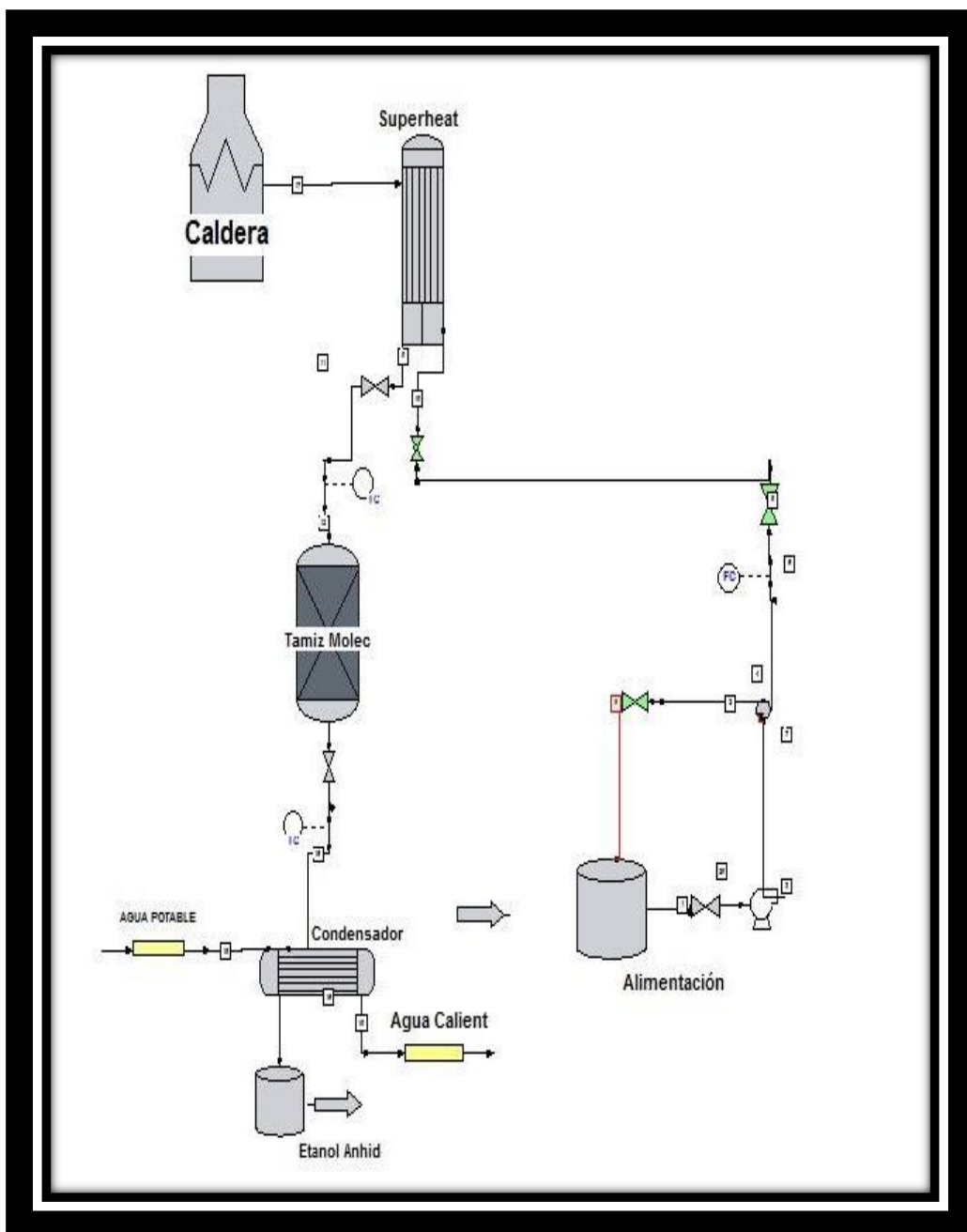


Figura 28. Diagrama para proceso de deshidratación de la mezcla etanol-agua.

Elaborado por: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

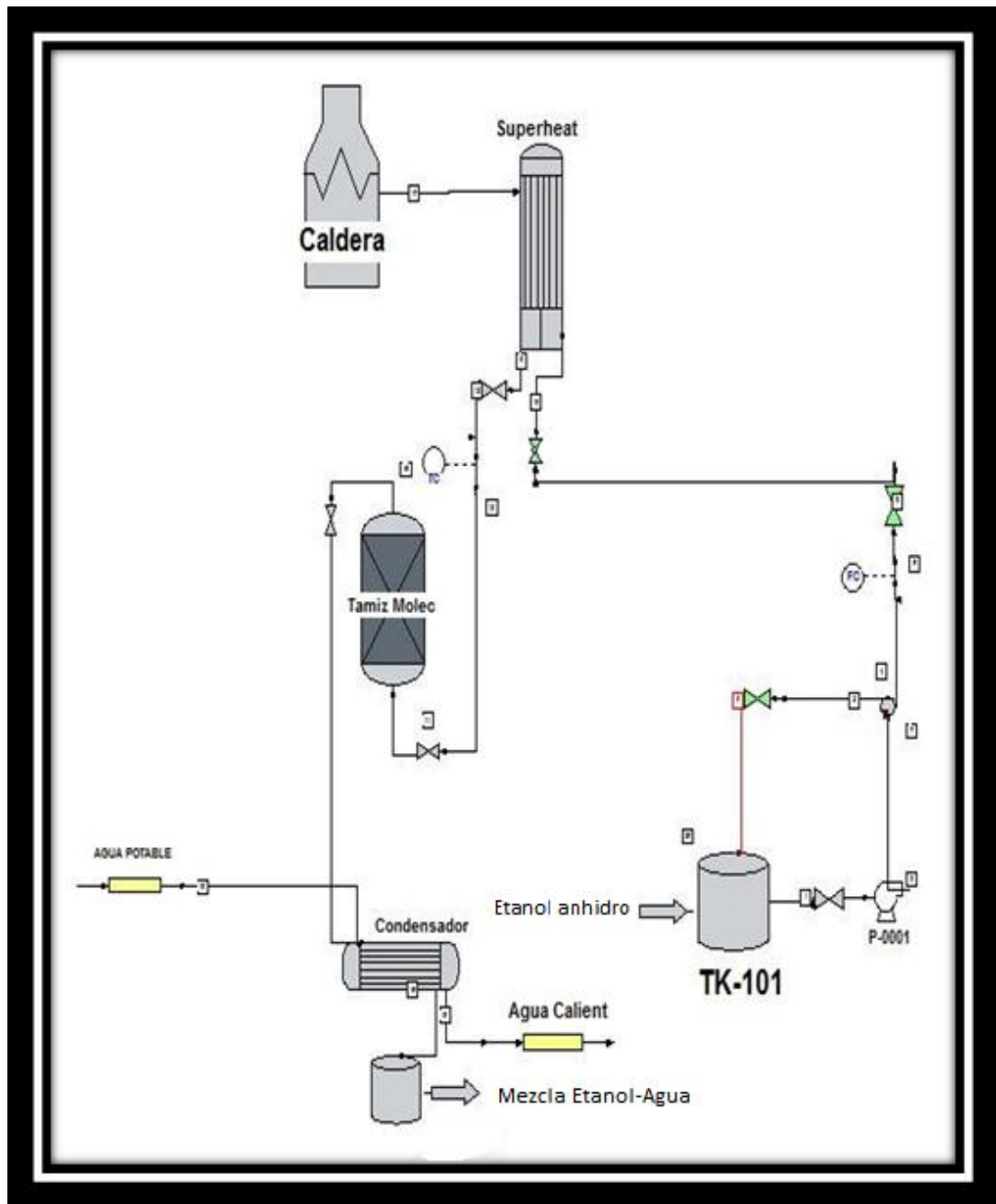


Figura 29.Diagrama para proceso de regeneración del lecho, ingresando etanol anhidro en contra corriente.

Elaborado por: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

3.5. COSTOS

La unidad de deshidratación de etanol que se ha implementado es destinada para uso demostrativo y académico del método industrial basado en tamices moleculares para obtener etanol a una concentración mayor al punto azeotrópico de la mezcla etanol-agua.

Consideramos que el proyecto será de utilidad para las futuras promociones de la carrera de ingeniería química, el cual es necesario que se le dé el mantenimiento adecuado para que su duración sea aún mayor.

La mayoría de las líneas son de acero inoxidable, el material a pesar de ser más costoso en comparación a los demás, dará mayor durabilidad al equipo.

Los intercambiadores de calor inicialmente iban a ser construidos e iban a tener el diseño de tubos concéntricos, los cuales tenían el costo aproximado de \$ 400 los dos equipos; gracias a la predisposición a ayudarnos de una industria reconocida a nivel Nacional fueron donados, lo único en lo que se gastó para ambos equipos fue la movilización y su mantenimiento.

El detalle de la inversión que se realizó, se tomó en cuenta mano de obra, materiales y gastos de operación; los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 9. Inversión del proyecto.

INVERSIÓN DEL PROYECTO				
Nº	Aplicación	Descripción	Cantidad	Precio
1	Estructura	Ángulo de hierro 2x1/8" 1.8 m	8	\$ 73,25
2	Equipos	Intercambiador de calor	2	-
3		Tamiz molecular	1	\$ 170,00
4	Medidores	Rotámetro	1	\$ 60,00
5		Hidrómetro	1	\$ 48,00
6	Accesorios	Trampa de vapor	1	\$ 80,00
7		Filtro Y Inoxidable	1	\$ 45,00
8		Codo 1/2" x 90 - Hierro negro	2	\$ 0,70
9		Nudo 1/2" Hierro negro	2	\$ 3,45
10		Unión 1/2" Hierro negro	2	\$ 0,60
11		Tee 1/2" Hierro negro	2	\$ 0,76
12		Bushing 1/2 x 1/4 Hierro negro	2	\$ 1,60
13		Bushing 3/4 x 1/2 Hierro negro	2	\$ 1,40
14		Codo 1/4 x 90 Hierro negro	1	\$ 0,95
15		Neplo 1/4 Hierro negro	2	\$ 1,80
16		Neplos 1/2" con cintura - Inox	14	\$ 37,21
17		Nudo 1/2" Inox	6	\$ 24,51
18		Codo 1/2" x 90 - Inox	9	\$ 10,69
19		Neplo 1/2" x 4" - inox	2	\$ 3,68
20		Neplo 1/2" x 5" - inox	1	\$ 2,18
21		Neplo hexagonal 1" Inox	4	\$ 9,15
22		Tee 1/2" Inox	4	\$ 9,79
23		Reductor 1" x 1/2" inox	4	\$ 20,77
24		Neplo 1/2" x 3" - inox	7	\$ 17,50
25		Neplo 1/2" x 1" inox	7	\$ 9,58
26		Bushing 1 1/2" - 1/2" inox	2	\$ 4,50
27		Válvula de bola 1/2" inox	2	\$ 9,71
28		Válvula de bola 1/2" Bronce cromado	7	\$ 29,42
29		Abrazadera 7/8" inox	1	\$ 0,44
30		Tee 1/2" PVC	1	\$ 0,92
31		Codo 1/2" PVC	4	\$ 1,52
32		Neplo 1/2" PVC RM	3	\$ 0,66
33		Unión 1/2" PVC	3	\$ 1,20
34		Nudo 1/2" PVC	1	\$ 0,88
35		Unión 1/2" PVC RR	1	\$ 4,29
36		Pernos	Varios	\$ 14,00

37	Líneas de proceso	Tubería 1/2" x 3m - Inoxidable	1	\$ 26,79
38		Tubería 1/2" x 3m - PVC	1	\$ 5,20
39		Tubería 1/2" x 7,8m - Hierro negro	1	\$ 11,70
40	Mano de obra	Construcción de estructura	-	\$ 110,00
41		Construcción de las líneas de proceso	-	\$ 80,00
42		Aislamiento de tubería de vapor	-	\$ 70,00
43	Importación	Impuesto	-	\$ 91,60
44		Envío a Ecuador	-	\$ 46,00
45		Salida de divisas	-	\$ 12,00
46	Materiales varios	Permatex silicón alta temperatura	2	\$ 3,32
47		Desoxidante	2	\$ 7,50
48		Pintura para alta temperatura	1	\$ 9,00
49		Teflón Industrial 3/4 x 15m	4	\$ 8,43
50		Fabricación empaque	4	\$ 20,00
51		Diluyente 1L	4	\$ 4,80
52	Costo de operación	Alcohol Anhidro - caneca 20 L	4	\$ 80,00
53		Caneca de diésel	2	\$ 10,00
54	Logística	Movilización	-	\$ 24,00
TOTAL				\$ 1.247,20

El costo total del proyecto es de \$ 1247,20, y si se hubiese considerado los intercambiadores de calor, se hubiese tenido una inversión aproximada de \$ 1800.

CAPÍTULO 4

MANUAL DE OPERACIÓN.

4.1. IDENTIFICACIÓN.

Tabla 10. Identificación de los diferentes componentes que conforman el sistema de deshidratación.

VÁLVULAS	
IDENTIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
V-100	Válvula de globo a la salida del tanque de alimentación.
V-101	Válvula de globo que permite el paso de la alimentación a la bomba P-01
V-102	Válvula de globo de recirculación del alcohol de alimentación.
V-103	Válvula de globo que conecta al equipo de destilación.
V-104	Válvula de vapor que ingresa al equipo.
V-105	Válvula de globo a la entrada al intercambiador de calor.

V-106	Válvula de globo a la salida del intercambiador de calor.
V-107	Válvula de globo a la entrada al tamiz molecular
V-108	Válvula de globo a la entrada al condensador
V-109	Válvula de globo que permite el paso a la entrada de la línea para regeneración a contracorriente.
V-110	Válvula de globo de entrada al tamiz para regeneración a contracorriente.
V-111	Válvula de globo a la salida del tamiz molecular en la línea de regeneración a contracorriente.
V-112	Válvula de globo en la línea de regeeración que permite la entrada al condensador.
V-113	Válvula de globo que se encarga de purgar el condensado de la línea de vapor.

TANQUES DE ALMACENAMIENTO

IDENTIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
TK-101	Tanque de alimentación
TK-102	Tanque de preparación de muestra/ Tanque de almacenamiento de producto obtenido (alcohol deshidratado).
TK-103	Tanque para el condensado del intercambiador de calor.
TK-104	Tanque de almacenamiento para la purga del alcohol que no se procesó de la alimentación.

DISPOSITIVOS DE CONTROL

IDENTIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
FIC-001	Controlador del flujo que ingresa al sistema. Rango de 0.1-1 GPM.




BOMBAS

IDENTIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
P-001	Bomba de 5HP encargada del bombeo de la alimentación de

	alcohol y de la recirculación del mismo.
--	--

Elaborado por: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

Tabla 11. Factores de riesgo en la unidad de deshidratación de etanol.

Riesgo/ Factor de riesgo	Descripción de riesgo	
Físico/ Altas temperaturas	Cuando la unidad se encuentra en operación, existen zonas de alta temperatura, como el tamiz molecular y los intercambiadores de calor.	
Químico/ Vapores de etanol.	El etanol por ser un compuesto volátil emana vapores fuertes los cuales son altamente inflamables y puede ocasionar problemas en la salud, en caso de que existir la protección adecuada.	
Ergonómico/ manejo manual de cargas.	En la unidad de deshidrtación se requiere de levantamiento y manipulación de cargas como baldes y canecas.	
Ergonómico/ Movimientos repetitivos.	En el momento de operación de la unidad es necesario agacharse con	

	frecuencia para tomar las muestras.	
--	-------------------------------------	--

Elaborado por: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

4.2. EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL.

Para manejar este producto se necesita hacer uso de una vestimenta adecuada como una bata y lentes de seguridad.

Si se lo manipula constantemente es necesario utilizar guantes, para evitar irritaciones en la piel.

Para la operación de nuestro equipo es importante utilizar los siguientes EPP's:

Tabla 12. Equipos de protección personal necesarios para la operación de la unidad de deshidratación de etanol.

Zona de protección	EPP	Descripción de Riesgo	Imagen
Cabeza	Casco	-Caída de altura. -Caída de algún objeto hacia la cabeza	
Ojos	Gafas de protección	-Exposición a vapores muy concentrados.	

		-Salpicaduras de líquidos fuertes a alta temperatura o temperatura ambiente.	
Aparato respiratorio	Mascarilla	-Inhalación de vapores tóxicos	
Extremidades	Ropa de protección	-Salpicaduras de líquidos irritantes, calientes o fríos.	
	Botas punta de acero.	-Protección de caída de objetos en los pies.	
Manos	Guantes	-Tocar superficies calientes	

Elaborado por: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

4.3. MATERIALES.

Se requiere del uso de los siguientes materiales y equipos para poner en marcha el sistema que romperá el punto azeotrópico entre etanol-agua:

Materiales

- Probeta de 250 ml
- Vaso de Precipitación
- Cronómetro

Equipo

- Alcohómetro.

4.4. PROCEDIMIENTO PARA OBTENER ALCOHOL A UNA CONCENTRACIÓN MAYOR AL PUNTO AZEOTRÓPICO.

4.4.1. ARRANQUE DEL EQUIPO

1. Preparar 10 litros de solución de alcohol que se encuentre entre 93°-96°GL.



Figura 30. Preparación de mezcla Etanol-Agua.
Fuente: Salinas, David; Pactong, Solange.

2. Ajustar las válvulas del sistema de la siguiente manera:

ABIERTA	CERRADA
<ul style="list-style-type: none">• V-101• V-102• V-106• V-107• V-108	<ul style="list-style-type: none">• V-103• V-104• V-105• V-109• V-110• V-111• V-112• V-113• V-100

Figura 31. Ajuste de Válvulas abiertas y válvulas cerradas.

Fuente: Salinas, David; Pactong, Solange.

3. Abrir el controlador de flujo del rotámetro a la mitad de su capacidad.



Figura 32. Controlador de flujo.

Fuente: Pactong, Solange;
Salinas, David.

4.4.2. OPERACIÓN DEL EQUIPO

1. Llenar el tanque TK-101 con la solución de alcohol preparada previamente.



Figura 33. Llenando el tanque de alimentación con la mezcla preparada.

Fuente: Salinas, David; Pactong, Solange.

2. Prender la bomba P-001 y mantener la válvula V-102 abierta completamente para que recircule por 3 minutos.

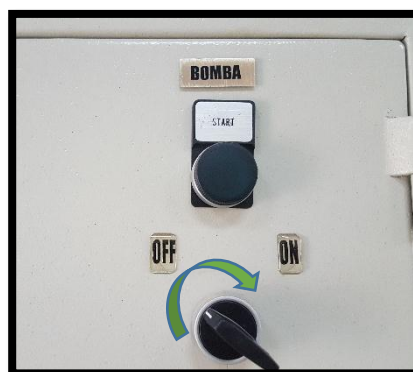


Figura 34. Panel donde se encuentra el control de la bomba.

Fuente: Salinas, David; Pactong, Solange.

3. Abrir la válvula de vapor del manifold que pertenece a la línea de vapor que conecta a nuestro equipo, teniendo en cuenta que la capacidad de la caldera se encuentre a 50 psi (g).

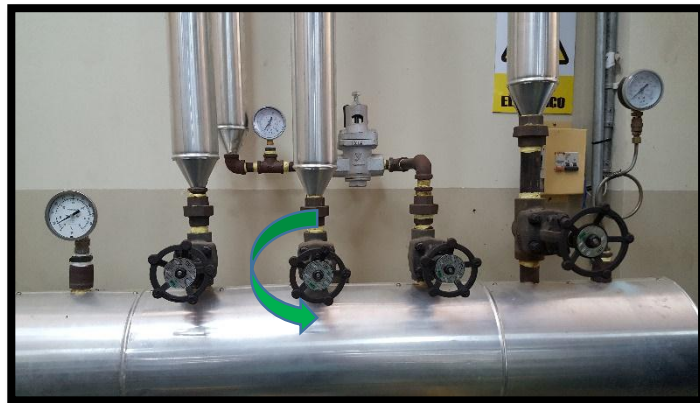


Figura 35. Válvula del manifold que conecta a la línea de la unidad.

Fuente: Salinas, David; Pactong, Solange.

4. Abrir con cuidado, lentamente la válvula de purga de condensado de la línea de vapor.

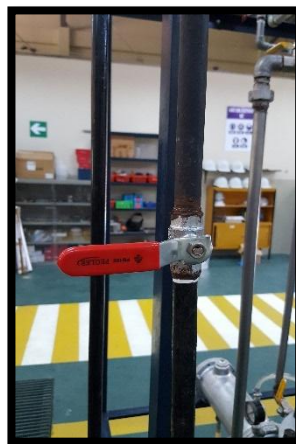


Figura 36. Válvulas de purga de condensado.

Fuente: Salinas, David; Pactong, Solange.

5. Abrir lentamente la válvula del vapor que ingresa al equipo V-104.

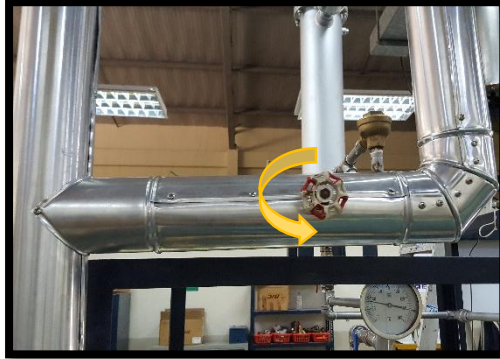


Figura 37. Válvula que permite el paso de vapor al equipo.

Fuente: Salinas, David; Pactong, Solange.

6. Abrir la válvula de entrada del intercambiador de calor V-105



Figura 38. Válvulas que permiten el ingreso y salida del intercambiador.

Fuente: Salinas, David; Pactong, Solange.

7. Abrir el grifo de agua de la red pública, el cual conecta la línea de agua fría al condensador

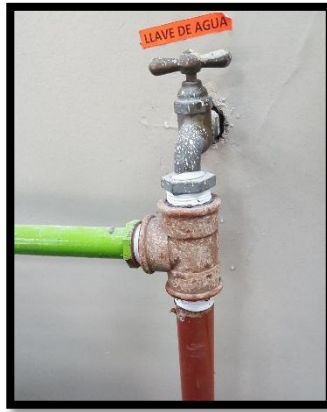


Figura 39. Grifo de la red pública.

Fuente: Salinas, David; Pactong, Solange.

8. Una vez que el termómetro de salida del tamiz molecular aumente su temperatura, se comienza a contar el tiempo con el cronómetro.
9. Cerrar un cuarto de la capacidad de la válvula de recirculación V-102 e ir regulando el flujo de tal manera que la temperatura del termómetro de entrada al tamiz no sea menor a 100°C , es preferible que se encuentre de 110°C en adelante.



Figura 40. Termómetro indicando la temperatura del tamiz molecular.

Fuente: Salinas, David; Pactong, Solange.

10. Tomar muestras cada cierto tiempo que la probeta llegue a 250 ml aproximadamente, de tal manera que se pueda leer sin problemas el valor de concentración de alcohol que indique el alcoholímetro.

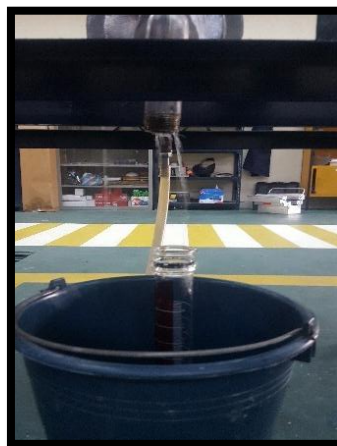


Figura 41. Toma de muestra en probeta de 250 ml.

Fuente: Salinas, David; Pactong, Solange.

*La medición de la concentración es preferible realizarla en una probeta que tenga igual o mayor capacidad de 250 ml, para el caso del alcoholímetro que se dispone actualmente en el LOPU

11. Una vez que la concentración del producto de alcohol obtenido llega a la concentración inicial, es decir de la alimentación indica que el tamiz se ha saturado, por consiguiente se procede a finalizar la práctica.

12. Estar pendiente del tanque de alimentación, una vez que el nivel llegue a la señal indicada se debe parar el equipo para así evitar dañar la bomba, para esto se debe abrir totalmente la válvula de recirculación V-102, cerrar la válvula de entrada del intercambiador de calor V-105, con el fin de evitar que regrese líquido caliente lo cual podría dañar el rotámetro y finalmente apagar la bomba.

4.4.3. PARADA DEL EQUIPO

1. Una vez apagada la bomba, hay que esperar hasta que termine de salir todo el alcohol condensado.
2. Cerrar el grifo de agua potable que alimenta de agua fría al condensador
3. Cerrar totalmente la válvula de vapor del equipo, utilizando guantes de protección térmica ya que se encuentra muy caliente

4. Cerrar la válvula de vapor de la línea de vapor del manifold que se encuentra conectada al equipo.
5. Dejar enfriar el equipo por 30 minutos.
6. Abrir la válvula de entrada del intercambiador de calor, teniendo abierta la del rotámetro y recirculación.
7. Abrir la válvula de purga de alimentación para medir el volumen de alcohol que no se utilizó, se debe retirar lo que más se pueda por ello se hace uso también de un vaso pequeño.



Figura 43. Remanente de alimentación.

Fuente: Salinas, David; Pactong, Solange.



Figura 42. Vaso pequeño utilizado para extraer toda la alimentación remanente.

Fuente: Salinas, David; Pactong, Solange.

8. Medir el volumen del producto total obtenido.
9. Se debe dejar todas las válvulas de los equipos abiertas, exceptuando la válvula de vapor y la purga del condensado del mismo.

10. Es recomendable dejar cerrada la válvula (V-105) hasta que el equipo se enfríe para evitar que el etanol caliente se regrese y tenga contacto con el rotámetro

4.5. PROCEDIMIENTO PARA REGENERAR EL TAMIZ MOLECULAR CON ALCOHOL ANHIDRO.

45.1. ARRANQUE DEL EQUIPO

1. Ajustar las válvulas del sistema de la siguiente manera:

ABIERTA	CERRADA
<ul style="list-style-type: none">• V-101• V-102• V-106• V-109• V-110• V-111• V-112	<ul style="list-style-type: none">• V-100• V-103• V-104• V-105• V-107• V-108• V-113

Figura 44. Ajuste de Válvulas abiertas y válvulas cerradas.

Fuente: Salinas, David; Pactong, Solange

2. Abrir el controlador de flujo del rotámetro a la mitad de su capacidad.



Figura 45. Controlador de flujo.

Fuente: Pactong, Solange;
Salinas, David.

4.5.2. OPERACIÓN DEL EQUIPO

1. Llenar el tanque TK-101 con 10 Litros de Alcohol anhidro.
2. Prender la bomba P-001 y mantener la válvula V-102 abierta completamente para que recircule por 3 minutos.
3. Abrir la válvula de vapor del manifold que pertenece a la línea de vapor que conecta a nuestro equipo, teniendo en cuenta que la capacidad de la caldera se encuentre a 50 psi (g).
4. Abrir con cuidado, lentamente la válvula de purga de condensado de la línea de vapor.
5. Abrir lentamente la válvula del vapor que ingresa al equipo V-104.
6. Abrir la válvula de entrada del intercambiador de calor V-105.
7. Abrir el llave de la red pública de agua que está conectada a la línea de agua fría para el condensador.

8. Una vez que el termómetro de salida del tamiz molecular aumente su temperatura, se comienza a contar el tiempo con el cronómetro.
9. Cerrar un cuarto de la capacidad de la válvula de recirculación V-102 e ir regulando el flujo de tal manera que la temperatura del termómetro de entrada al tamiz no sea menor a 100°C, es preferible que se encuentre de 110°C en adelante.
10. Tomar muestras cada cierto tiempo que la probeta llegue a 250 ml aproximadamente, de tal manera que se pueda leer sin problemas el valor de concentración de alcohol que indique el alcoholímetro.

*La medición de la concentración es preferible realizarla en una probeta que tenga igual o mayor capacidad de 250 ml, para el caso del alcoholímetro que se dispone actualmente en el LOPU

11. Una vez que la concentración del producto de alcohol obtenido llega a la concentración inicial, es decir de la alimentación en este caso que es alcohol anhidro tiene que ser de 99.9 \approx 100 GL , esto indica que el tamiz se ha saturado, por consiguiente se procede a finalizar la práctica.
12. Estar pendiente del tanque de alimentación, una vez que el nivel llegue a la señal indicada se debe parar el equipo para así evitar dañar la bomba, para esto se debe abrir totalmente la válvula de recirculación V-102, cerrar la válvula de entrada del intercambiador de calor V-105, con

el fin de evitar que regrese líquido caliente lo cual podría dañar el rotámetro y finalmente apagar la bomba.

4.5.3. PARADA DEL EQUIPO

1. Una vez apagada la bomba, hay que esperar hasta que termine de salir todo el alcohol condensado.
2. Cerrar la llave de agua fría del condensado
3. Cerrar totalmente la válvula de entrada de vapor del equipo, para evitar deformación de los tubos interiores, utilizando guantes de protección térmica ya que se encuentra muy caliente.
4. Cerrar la válvula de vapor de la línea de vapor del manifold que se encuentra conectada al equipo.
5. Dejar enfriar el equipo por 30 minutos.
6. Abrir la válvula de entrada del intercambiador de calor, teniendo abierta la del rotámetro y recirculación.
7. Abrir la válvula de purga de alimentación para medir el volumen de alcohol que no se utilizó, se debe retirar lo que más se pueda por ello se hace uso también de un vaso pequeño.
8. Medir el volumen del producto total obtenido.

9. Se debe dejar todas las válvulas de los equipos abiertas, exceptuando la válvula de vapor y la purga del condensado del mismo.
10. Es recomendable dejar cerrada la válvula (V-105) hasta que el equipo se enfríe para evitar que el etanol caliente se regrese y tenga contacto con el rotámetro

CAPÍTULO 5

RESULTADOS.

5.1. EXPERIMENTACIÓN

Primera prueba

Tabla 13. Datos de la primera prueba

Presión de vapor [psig]	50
VOLUMEN DE ALIMENTACIÓN [L]	8.3
FLUJO [GPM]	0.1
VOLUMEN DE REMANENTE [L]	1.5
VOLUMEN PROCESADO [L]	6.18
VOLUMEN DE ALCOHOL ANHIDRO OBTENIDO [L]	4.7

Volumen mezcla utilizada = Volumen alimentación – Volumen Remanente

Volumen mezcla utilizado = 8.3 – 1,5

Volumen mezcla utilizado = 6.8 L

Tabla 14. Resultados de la primera Experimentación

TIEMPO [min]	TEMPERATURA ENTRADA AL TAMIZ [°C]	TEMPERATURA SALIDA DEL TAMIZ [°C]	C. ENTRADA [°GL]	C. SALIDA [°GL]
3,05	110	76	95	100
6,07	116	78	95	100
9,06	112	78	95	100
12,4	110	78	95	100
14,09	110	79	95	99
16,3	112	79	95	98.5

Elaborado por: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

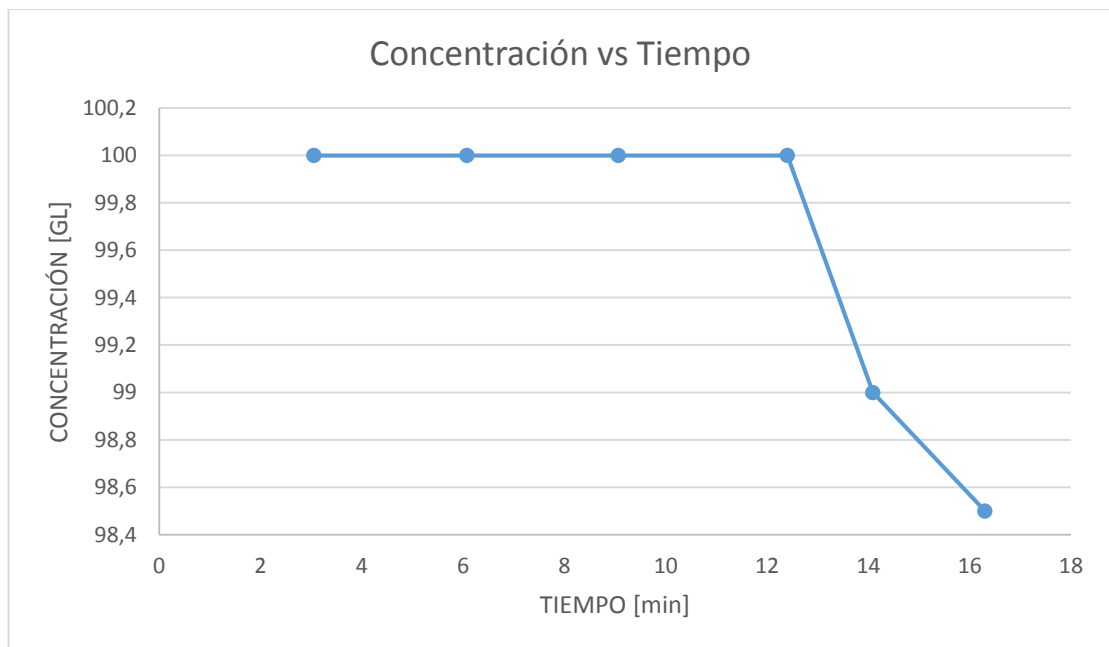


Figura 46. Curva de Concentración Vs. Tiempo con alimentación a 95°GL.

Elaborado por: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

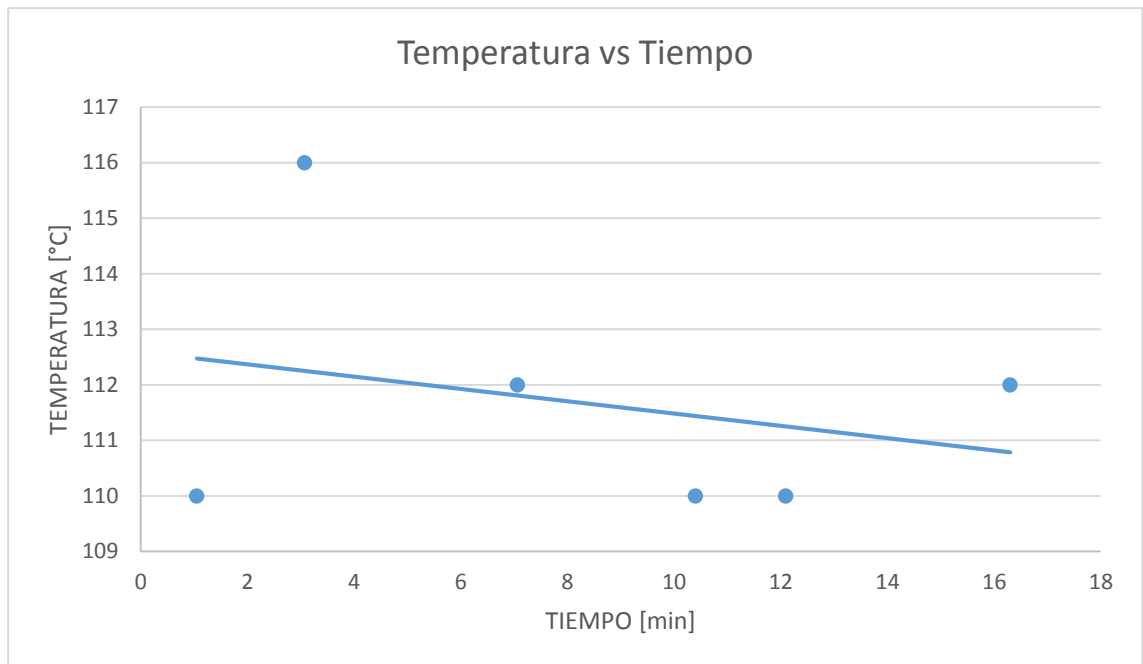


Figura 47. Curva de Temperatura Vs. Tiempo con alimentación a 95°GL.
Fuente:(Pactong, Solange; Salinas, David).

5.1.2. Segunda Prueba.

Luego de regenerar se hizo la siguiente prueba:

Tabla 15. Datos de la segunda prueba

Presión de vapor [psig]	50
VOLUMEN DE ALIMENTACIÓN [L]	10
FLUJO [GPM]	0,1
VOLUMEN DE REMANENTE [L]	1,95
VOLUMEN PROCESADO [L]	7.06
VOLUMEN DE ALCOHOL ANHIDRO OBTENIDO [L]	7.06

Volumen mezcla utilizado = Volumen alimentación – Volumen Remanente

Volumen mezcla utilizado = 10 – 1,95

Volumen mezcla utilizado = 8.05 L

Tabla 16. Resultados de la Segunda experimentación.

TIEMPO [min]	TEMPERATURA ENTRADA AL TAMIZ [°C]	TEMPERATURA SALIDA DEL TAMIZ [°C]	C. ENTRADA [°GL]	C. SALIDA [°GL]
2,5	114	80	97	100
4,02	112	79	97	100
6,02	110	79	97	100
9,06	110	79	97	100
11,17	109	74	97	100
13,09	109	76	97	100
15,82	110	79	97	100
18,63	109	79	97	100

Elaborado por: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

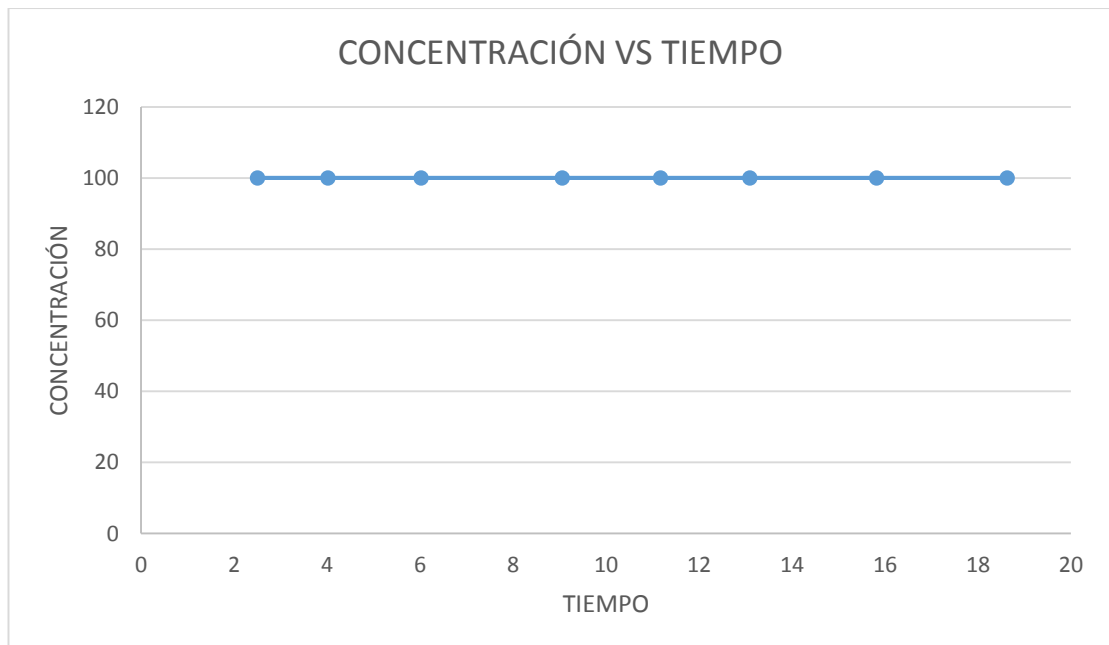


Figura 48. Gráfica de Concentración vs. Tiempo con alimentación a 97°GL.
Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

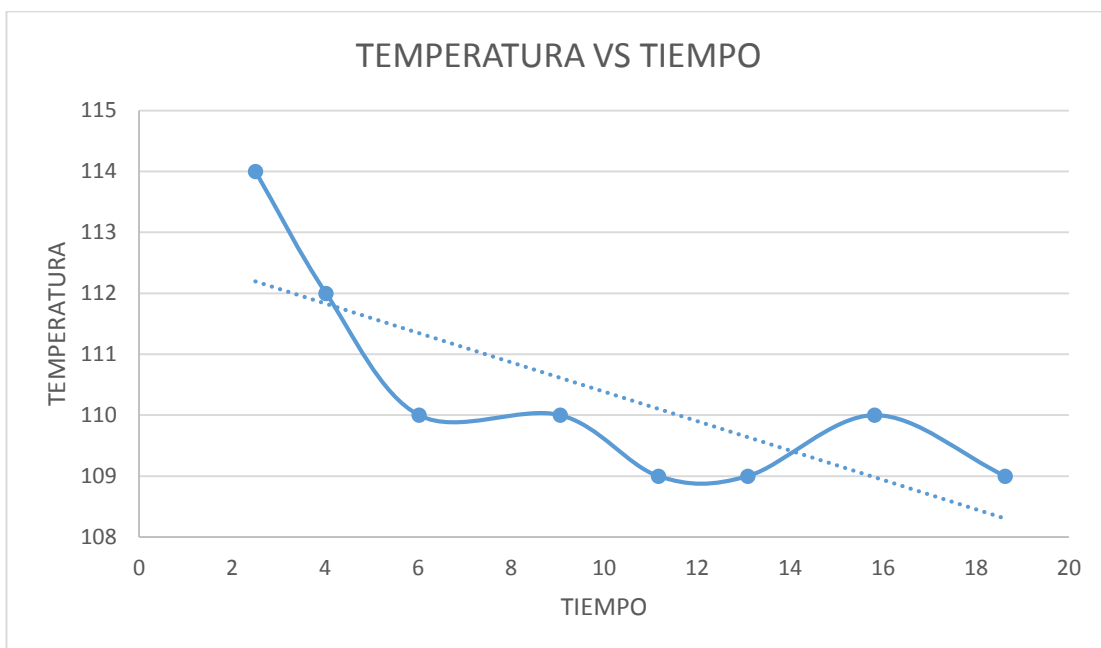


Figura 49. Curva de Temperatura Vs. Tiempo con alimentación a 97°GL.
Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

5.1.3. Regeneración.

Tabla 17. Datos de la Regeneración después de la segunda prueba.

Presión de vapor [psig]	50
VOLUMEN DE ALIMENTACIÓN [L]	11,5
FLUJO [GPM]	0.15
VOLUMEN DE REMANENTE [L]	1.5
VOLUMEN DEL PRODUCTO [L]	9

$$\text{Alcohol utilizado} = \text{Volumen alimentación} - \text{Volumen Remanente}$$

$$\begin{aligned} \text{Alcohol Utilizado} &= 11,5 - 1,5 \\ &= 10 L \end{aligned}$$

Tabla 18. Resultados de la regeneración

TIEMPO [min]	TEMPERATURA ENTRADA AL TAMIZ [°C]	TEMPERATURA SALIDA DEL TAMIZ [°C]	C. ENTRADA [°GL]	C. SALIDA [°GL]
1,02	110	-	100	96
3,05	112	-	100	97
6,03	108	-	100	97
9,0	112	-	100	98
11,0	110	-	100	98
13,01	113	-	100	99
15,95	114	-	100	99
18,03	110	-	100	98,5
20,87	108	-	100	98,5
24,01	110	-	100	99
26,02	108	-	100	99
28,30	107	-	100	100

Elaborado por: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

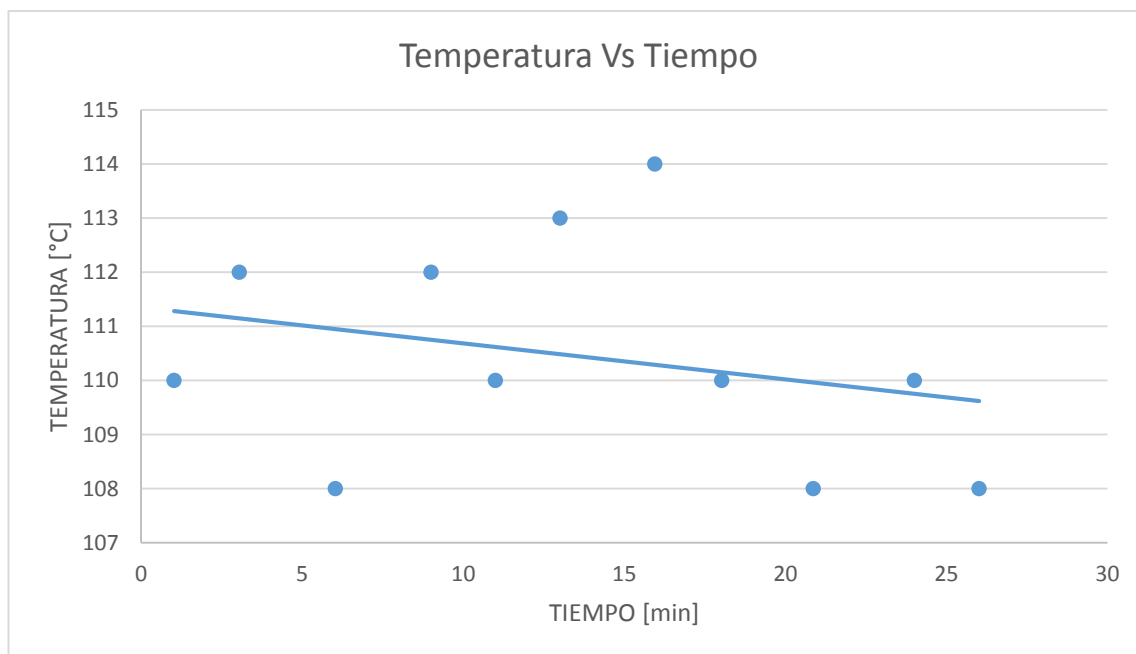


Figura 50. Curva de temperatura Vs. Tiempo con alcohol anhidro.

Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

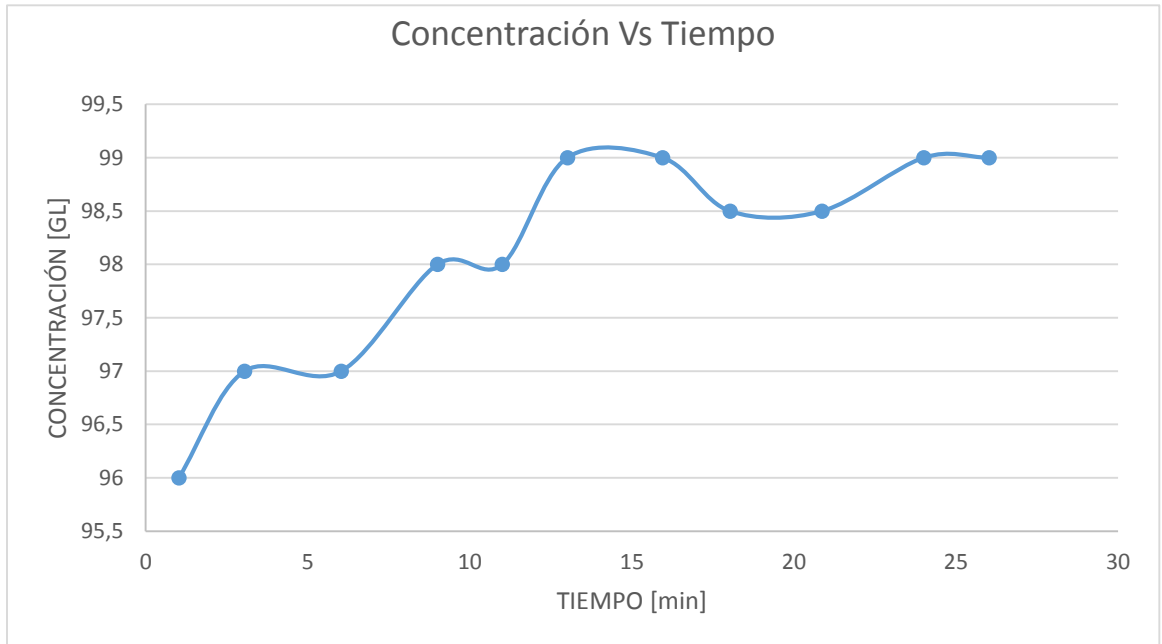


Figura 51. Curva de Concentración Vs. Tiempo con alimentación de alcohol anhidro.

Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

5.1.4. Tercera prueba.

Tabla 19. Datos de la tercera prueba

Presión de vapor [psig]	50
VOLUMEN DE ALIMENTACIÓN [L]	9
FLUJO [GPM]	0.1
VOLUMEN DE REMANENTE [L]	1
VOLUMEN PROCESADO [L]	7.30
VOLUMEN DE ALCOHOL ANHIDRO OBTENIDO [L]	4.13

Volumen mezcla utilizado = Volumen alimentación – Volumen Remanente

$$Volumen\ mezcla\ utilizado = 9 - 1$$

Volumen mezcla utilizado = 8 L

Tabla 20. Resultados de la tercera experimentación

TIEMPO [min]	TEMPERATURA ENTRADA AL TAMIZ [°C]	TEMPERATURA SALIDA DEL TAMIZ [°C]	C. ENTRADA [°GL]	C. SALIDA [°GL]
2,36	110	78	91	100
3,78	108	78	91	100
5,15	113	78	91	100
7,66	110	78	91	100
9,03	106	78	91	100
10,89	108	78	91	100
13,80	108	79	91	99
15,00	108	78	91	99
17,01	114	79	91	98,5
19,42	110	76	91	97

Elaborado por: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

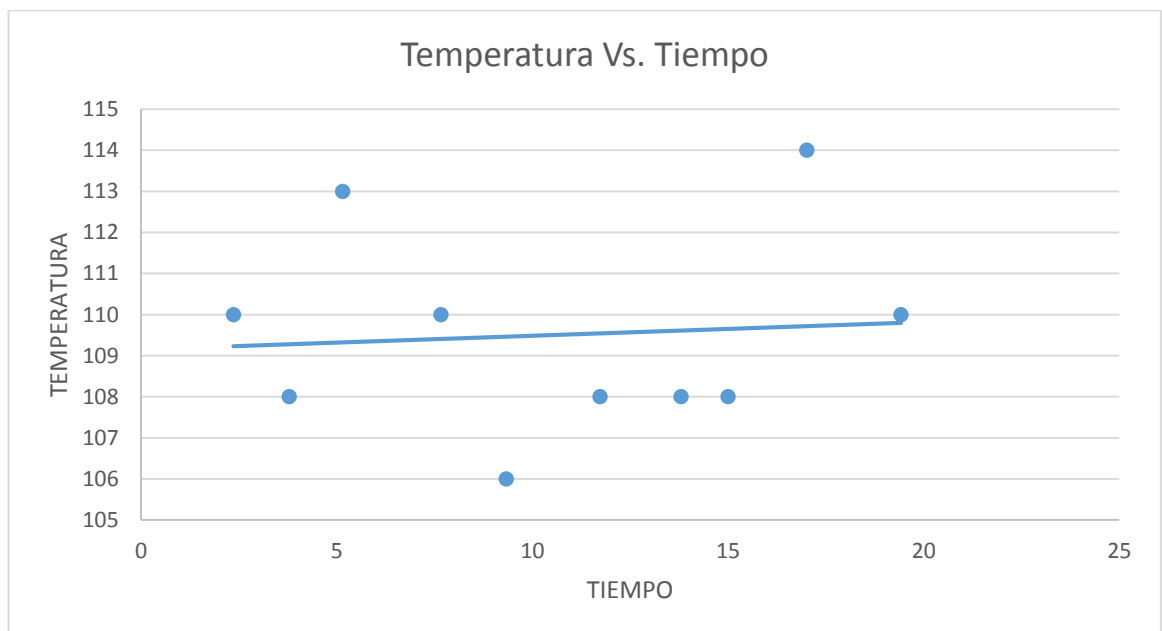


Figura 52. Curva de Temperatura Vs. Tiempo con alimentación a 91 °GL.

Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

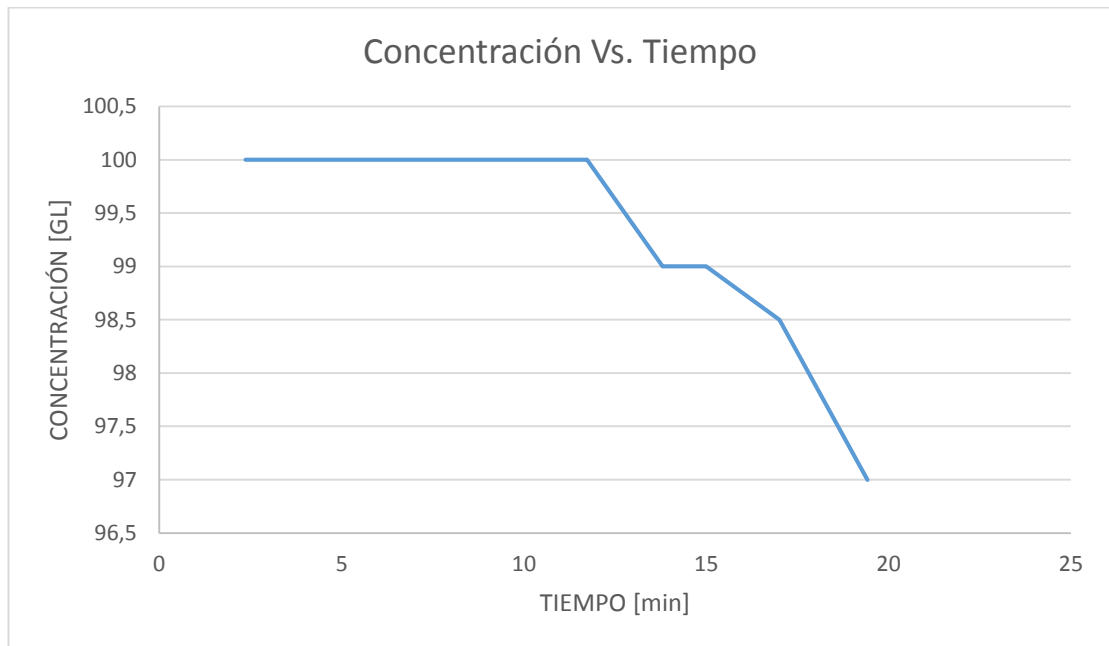


Figura 53. Curva de Concentración Vs. Tiempo con alimentación a 91°C.
Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

5.1.5. Regeneración.

Tabla 21. Datos de la regeneración luego de la tercera prueba.

Presión de vapor [psig]	50
VOLUMEN DE ALIMENTACIÓN [L]	13
FLUJO [GPM]	0.15
VOLUMEN DE REMANENTE [L]	1,75
VOLUMEN DEL PRODUCTO [L]	9

$$\text{Alcohol utilizado} = \text{Volumen alimentación} - \text{Volumen Remanente}$$

$$\text{Alcohol Utilizado} = 13 - 1,75$$

$$= 11.25 L$$

Tabla 22. Resultados de la regeneración.

TIEMPO [min]	TEMPERATURA ENTRADA AL TAMIZ [°C]	TEMPERATURA SALIDA DEL TAMIZ [°C]	C. ENTRADA [°GL]	C. SALIDA [°GL]
5,48	113	-	99	96
7,32	111	-	99	97
9,90	111	-	99	97
13,23	109	-	99	98
15,90	111	-	99	99
18,32	109	-	99	99
20,67	108	-	99	99
22,83	108	-	99	100

Elaborado por: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

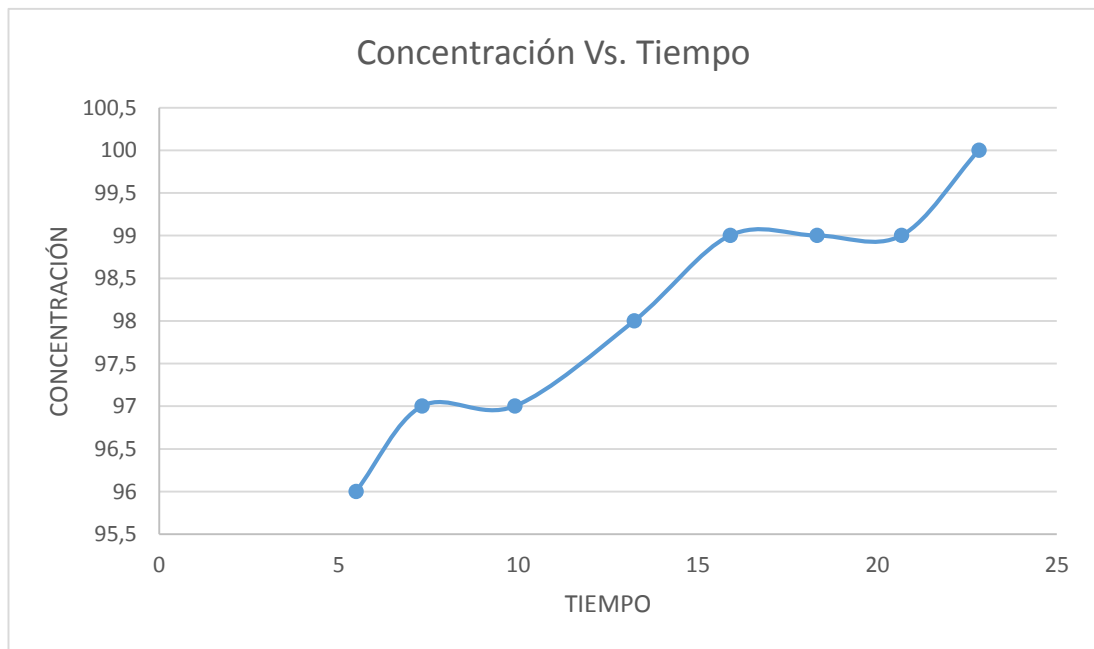


Figura 54. Curva de Concentración Vs. Tiempo con alimentación de alcohol anhidro.

Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

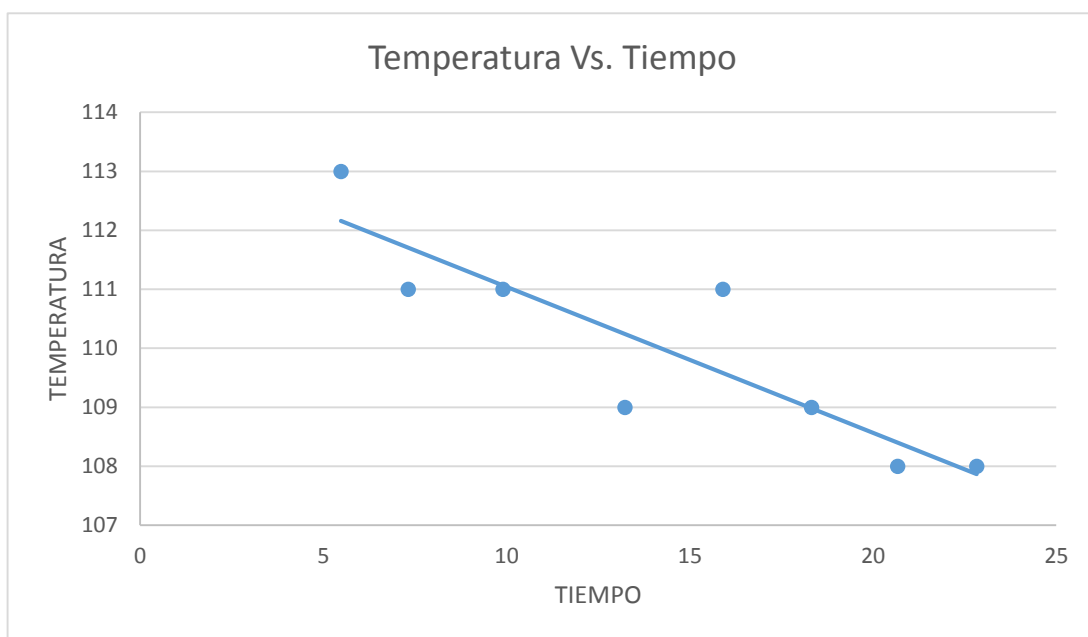


Figura 55. Curva de Temperatura Vs. Tiempo con alimentación de alcohol anhidro.

Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

5.1.6. Cuarta Prueba

Tabla 23. Datos de la Cuarta Prueba

Presión de vapor [psig]	50
VOLUMEN DE ALIMENTACIÓN [L]	25
FLUJO [GPM]	0.10
VOLUMEN DE REMANENTE [L]	0.90
VOLUMEN DEL PRODUCTO TOTAL [L]	23.12
VOLUMEN DE ALCOHOL ANHIDRO OBTENIDO [L]	4.4

Volumen Mezcla utilizada = Volumen alimentación – Volumen Remanente

$$Volumen Utilizado = 25 - 0.90$$

$$= 24.1 L$$

Tabla 24. Resultados de la cuarta experimentación.

TIEMPO [min]	TEMPERATURA ENTRADA AL TAMIZ [°C]	TEMPERATURA SALIDA DEL TAMIZ [°C]	C. ENTRADA [°GL]	C. SALIDA [°GL]
5,77	108	78	89	100
7,42	108	79	89	100
9,03	108	78	89	100
10,50	106	78	89	100
11,50	106	78	89	100
13,13	107	78	89	99,8
15,21	108	78	89	99
17,42	110	78	89	97,5
20,42	111	78	89	96
23,21	110	78	89	96
24,88	110	79	89	95
27,05	110	78	89	94,8
29,06	109	78	89	94
30,92	108	79	89	93
32,95	106	79	89	92,5
35,00	104	79	89	92
37,33	104	79	89	91,5
38,88	104	79	89	91
41,37	104	79	89	90
43,80	106	79	89	89
46,83	106	79	89	89
49,25	102	79	89	89
51,88	104	79	89	89
53,83	107	79	89	89
56,40	105	79	89	89
59,01	106	79	89	89
61,00	104	79	89	89

Elaborado por: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

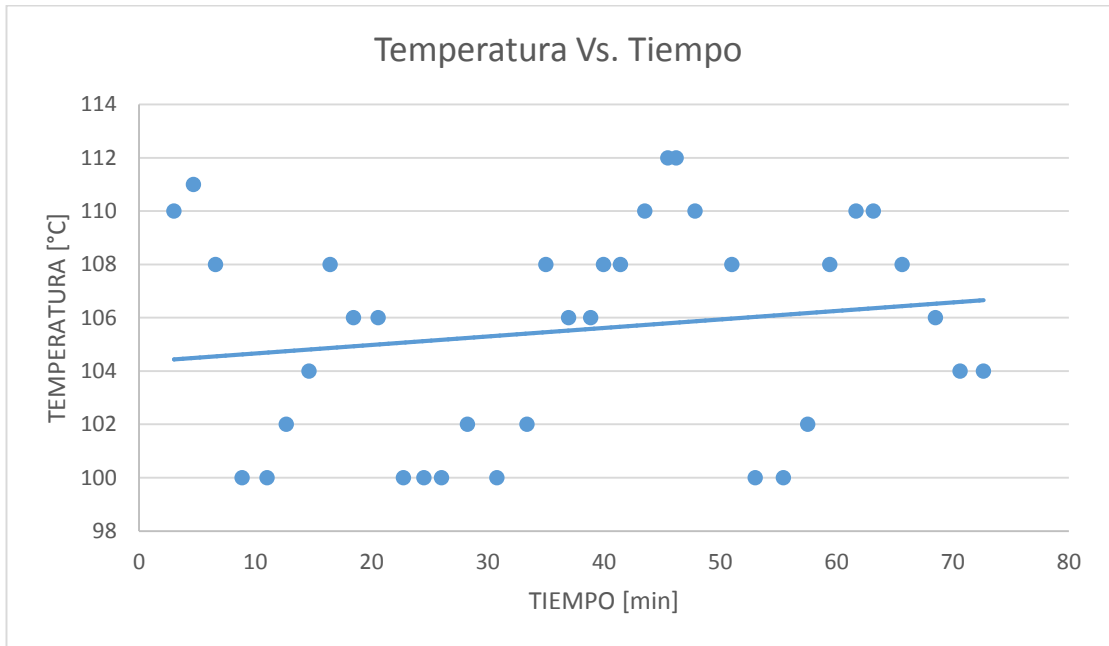


Figura 56. Curva de Temperatura Vs. Tiempo con alimentación a 89°GL.
Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

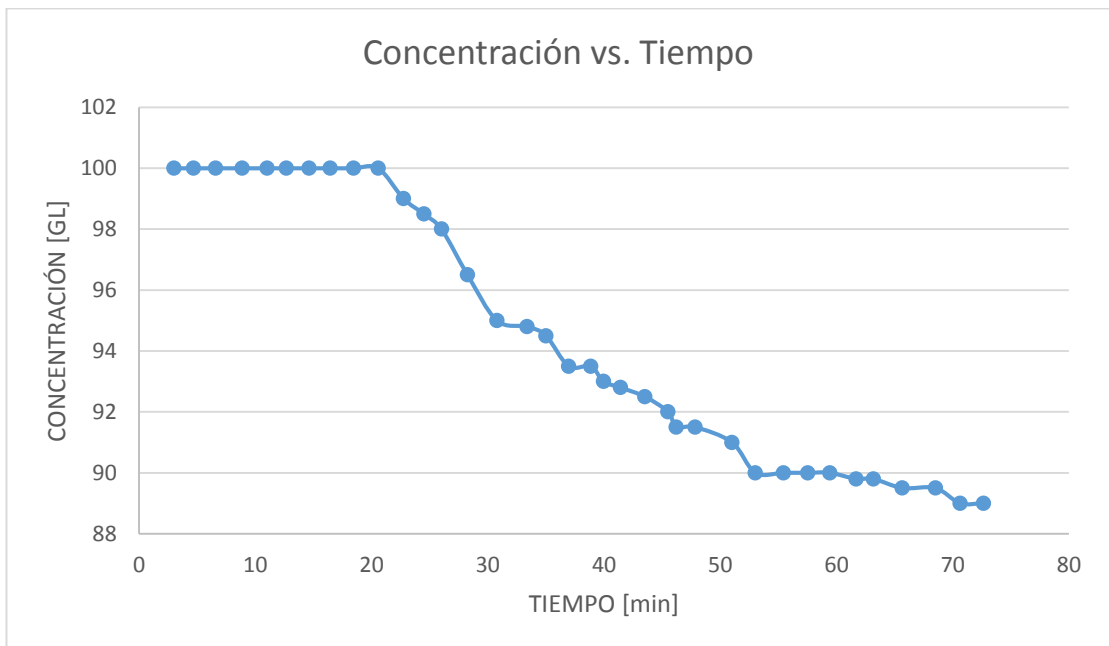


Figura 57. Curva de Concentración Vs. Tiempo con alimentación a 89°GL.
Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

5.1.7. Regeneración

Tabla 25. Datos de la Regeneración de la cuarta prueba

Presión de vapor [psig]	50
VOLUMEN DE ALIMENTACIÓN [L]	16
FLUJO [GPM]	0,1
VOLUMEN DE REMANENTE [L]	2,65
VOLUMEN DEL PRODUCTO [L]	10,30

Alcohol Anhidro utilizado:

$$\text{Alcohol utilizado} = \text{Volumen alimentación} - \text{Volumen Remanente}$$

$$\text{Alcohol Utilizado} = 16 - 2,65$$

$$= 13.35 L$$

Tabla 26. Resultados de la regeneración.

TIEMPO [min]	TEMPERATURA ENTRADA AL TAMIZ [°C]	TEMPERATURA SALIDA DEL TAMIZ [°C]	C. ENTRADA [°GL]	C. SALIDA [°GL]
5,75	108	-	100	92
7,92	112	-	100	94
9,01	114	-	100	95
10,92	112	-	100	96
12,82	110	-	100	97
15,18	112	-	100	97
17,67	110	-	100	97
21,65	102	-	100	97
23,27	106	-	100	97,5
24,72	108	-	100	98,5
26,37	109	-	100	99
28,42	108	-	100	99
30,6	108	-	100	99,5
33,16	106	-	100	99,5
35,70	106	-	100	100

Elaborado por: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

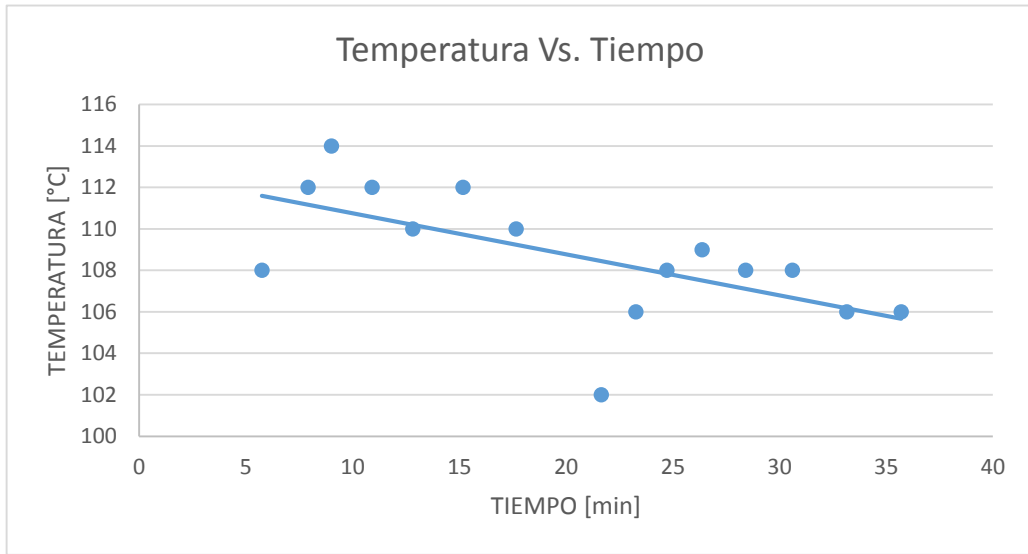


Figura 58. Curva de Temperatura Vs. Tiempo con alimentación de alcohol anhidro.

Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

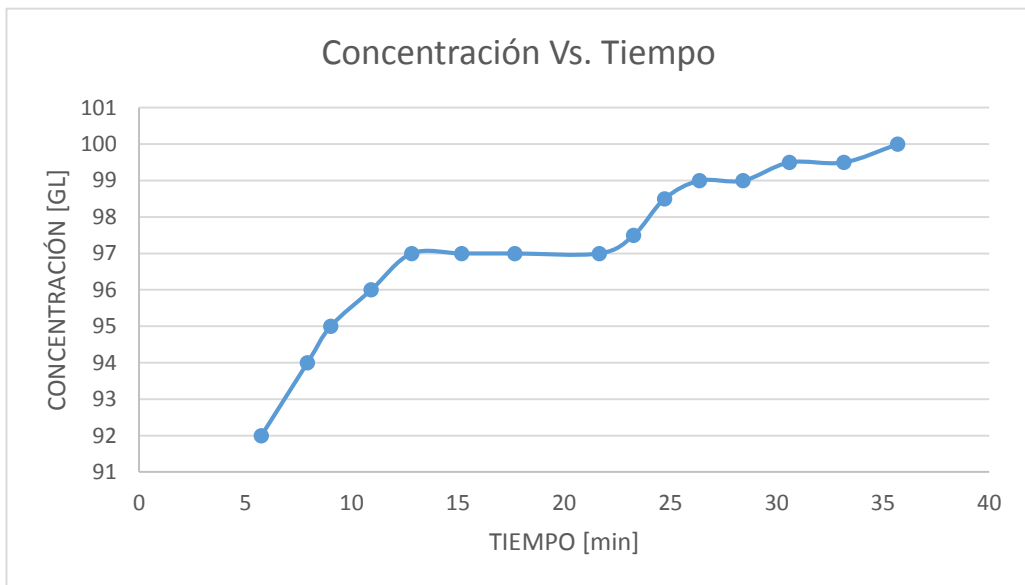


Figura 59. Curva de Concentración Vs. Tiempo con alimentación de alcohol anhidro.

Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, David.)

Los datos de temperatura a la entrada del tamiz durante todas las prácticas molecular tuvieron mucha variabilidad por lo que se procede a hacer un análisis estadístico de todos los datos tomados durante los proceso de adsorción. Para sólo tomar en cuenta una muestra representativa de los datos de temperaturas se calculó el número del mismo tomando en cuenta un nivel de confianza del 95% ($z=1.96$) es decir un error máximo del 5%:

$$n = \frac{N \times Z^2 \times p \times (1 - p)}{(N - 1) \times e^2 + Z^2 \times p \times (1 - p)}$$

Donde:

N= Cantidad total de las muestras.

Z= Desviación estándar acorde al nivel de confianza admitido.

n= Cantidad de la muestra representativa.

p= % Proporción que se espera encontrar del total de las muestras, en caso de no tener noción alguna del mismo se debe asumir 50%.

e= % Error permitido para el cálculo.

La cantidad total de datos que se dispone de temperaturas es de 51 valores, en vista de que se no se tiene noción de cuantos datos aproximadamente deben ser del total se eligió un 50%, y error admitio del 5%.

$$n = \frac{51 \times 1.96^2 \times 0.5 \times (1 - 0.5)}{(51 - 1) \times 0.05^2 + 1.96^2 \times 0.5 \times (1 - 0.5)}$$

$$n = 45$$

Entonces el valor de muestras representativas es de 45.

Los valores fueron aleatorios y se muestran graficados en la siguiente figura:

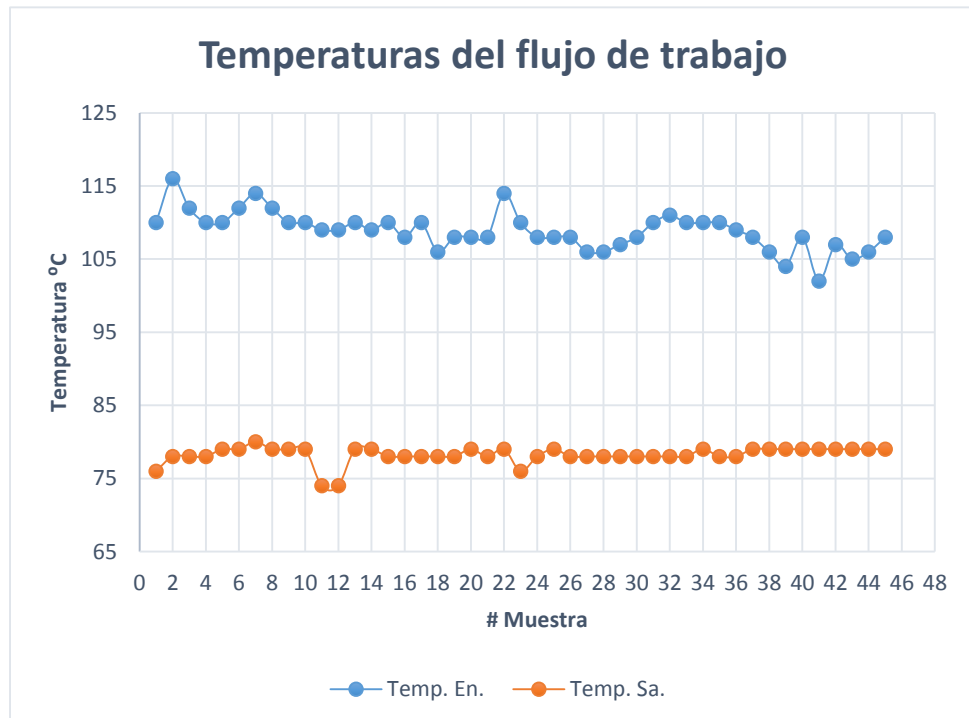


Figura 60. Variación de datos de la temperatura de todas las muestras.

En base a los datos de la muestra se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 27. Resultados de datos estadísticos

	Temperatura Entrada	Temperatura Salida
Media	108,89	78,22
Desviación Estándar	2,57	1,17
Moda	110	78
Varianza	6,74	1,40
Mínimo	102	74
Máximo	116	80

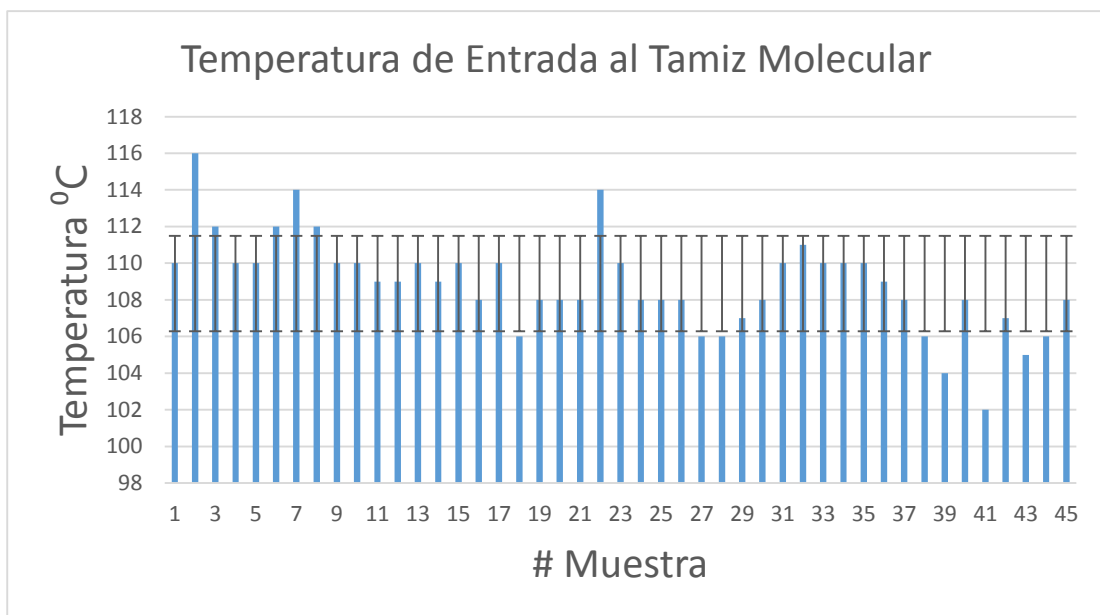


Figura 61. Variación de Temperatura de entrada del tamiz

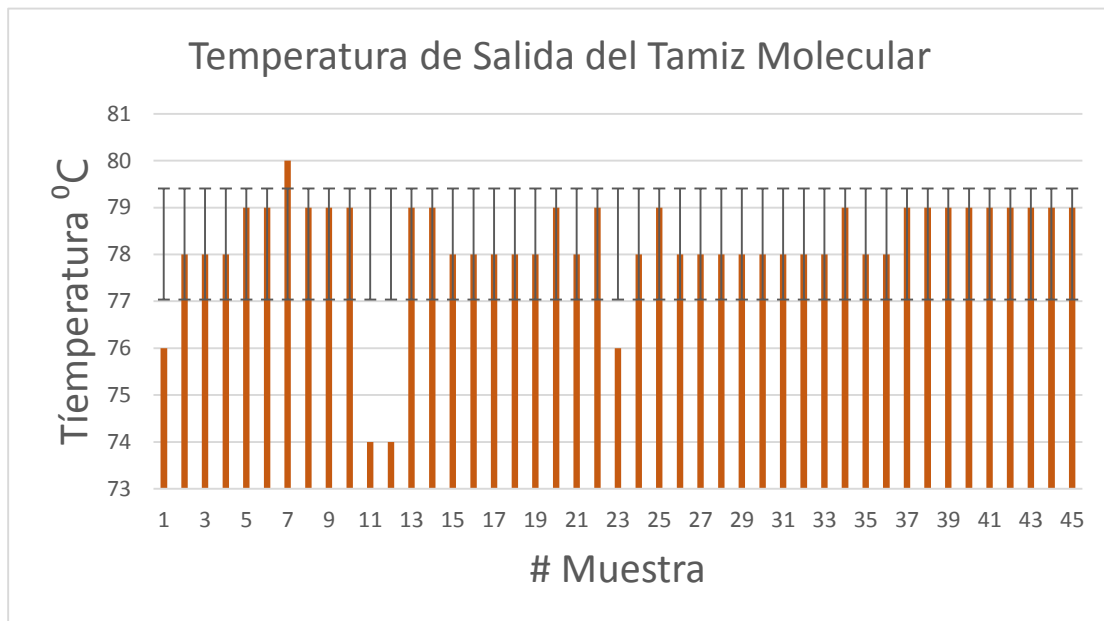


Figura 62. Variación de temperatura de salida de tamiz molecular

Para saber la cantidad real de agua retenida por el tamiz procedimos a realizar un balance volumétrico de la cuarta prueba, ya que fue la única que se la realizó hasta que se sature totalmente el lecho.

Con el caudal de proceso de 0.1 gpm calculamos los galones totales hasta el tiempo de saturación completa del lecho el cual es de 41.37 minutos:

$$\text{Galones procesados} = 0.1 \frac{\text{gal}}{\text{min}} \times 41.37 \text{ min}$$

$$\text{Galones procesados} = 4.137 \text{ gal}$$

Para el cálculo de los galones de agua utilizamos la concentración medida de todo el producto en ese instante de tiempo, el cual es de 93^oGL, es decir que el 93% es etanol y el 7% es agua, por lo tanto:

Balance de etanol:

$$CE \times GE = C_S \times GP$$

Donde:

CE= Concentración de inicio, ^oGL.

CS= Concentración final, ^oGL.

GE= Galones de entrada, gal.

GP= Galones de producto, gal.

$$0.89 \times 4.137 \text{ gal} = 0.93 \times GP$$

$$GP = 3.96 \text{ gal}$$

Cantidad de agua en el producto.

Donde:

AP= Cantidad de agua en el producto, gal.

$$AP = 3.96 \text{ gal} \times 0.07$$

$$AP = 0.277 \text{ gal}$$

Cantidad de agua al inicio:

Donde:

AE= Cantidad de agua en la entrada, gal.

$$AE = 4.137 \text{ gal} \times 0.11$$

$$AE = 0.455 \text{ gal}$$

Cantidad de agua retenida:

Donde:

AR= Cantidad de agua retenida en el tamiz, gal.

$$AR = 0.455 \text{ gal} - 0.277 \text{ gal}$$

$$AR = 0.178 \text{ gal}$$

Ahora lo llevamos a unidades de libras para compararlo con el valor teórico:

$$\text{Masa de agua retenida} = 0.178 \text{ gal} \times \frac{3.78 \text{ l}}{\text{gal}} \times \frac{\text{m}^3}{1000 \text{ l}} \times \frac{1000 \text{ Kg}}{\text{m}^3} \times \frac{2.2 \text{ lb}}{\text{Kg}}$$

$$\text{Masa de agua retenida} = 1.48 \text{ lb}$$

Comparando el valor real obtenido con el teórico de la cantidad de agua que puede retener el lecho se podría considerar como la eficiencia del tamiz:

$$\varepsilon = \frac{\text{Masa de agua retenida real}}{\text{Masa de agua retenida teóricamente}} \times 100$$

$$\varepsilon = \frac{1.48}{1.85} \times 100$$

$$\varepsilon = 80\%$$

En la siguiente tabla se muestran los tiempos en los que comienza a decaer el proceso de adsorción

Tabla 28. Tiempo que el lecho se comienza a saturar a diferentes concentraciones

°GL de alimentación	Tiempo (min)
89	13,13
91	13,8
95	14,09

Costos operativos:

En baso a los consumos tanto de flujos de agua, vapor y capacidad de la bomba se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 29. Costos operativos del sistema

Agua para condensador	\$0.065/h
Consumo de diesel	\$0.310/h
Producción de vapor	\$0.312/h
Electricidad	\$0.015/h

5.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas son satisfactorios, ya que hemos logrado concentrar etanol a partir de diferentes concentraciones menores al punto azeotrópico hasta un porcentaje en volumen mayor a 99°GL.

En todas las pruebas realizadas se puede observar gráficamente que a medida que avanza el tiempo la concentración empieza a disminuir, esto se debe a que la zeolita se empieza a saturar, por lo que ya no retiene la misma cantidad de agua.

En el caso de la primera prueba partimos desde 95°GL obteniendo alcohol anhidro los primeros 12 minutos, luego hasta el minuto 16 su concentración bajó a 98 °GL, cabe recalcar que no pudimos llegar hasta que la zeolita se

sature totalmente debido a la falta de volumen en la alimentación, ya que solo se contaba con 8,3 Litros. Comparándolo con la segunda prueba podemos observar que aquí se obtuvo alcohol anhidro hasta el minuto 18, esto es debido a que la concentración de alimentación fue de 97°GL, lo que verifica que a mayor concentración la zeolita se satura con más lentitud.

Para la tercera prueba en la que utilizamos etanol a 91°GL de concentración, la zeolita se comenzó a saturar pasados los 13 minutos, llegando hasta una concentración de 97°GL, ya que no logró saturarse completamente porque los 9 Litros de volumen de alimentación no fue suficiente para llegar a este punto. En la cuarta prueba que fue donde se trabajó con la concentración más baja de todas, el lecho se empezó a saturar a partir de los 13 minutos, esto comprueba una vez más que mientras más baja sea la concentración, más rápido se satura el tamiz molecular. En esta prueba se logró saturar por completo la Zeolita en un tiempo de 43.80 minutos, ya que contabamos con la alimentación suficiente de 25 Litros.

La temperatura a su vez juega un papel importante en los resultados de la deshidratación, ya que las moléculas de agua y alcohol se separan mientras la temperatura es mayor, es por este motivo que nuestra unidad de deshidratación trabaja a temperaturas mayores de 100°C, y cuando es superior a 110°C se desempeña de mejor manera, como se puede observar en las diferentes gráficas de las pruebas realizadas.

La temperatura de entrada al tamiz molecular presentaba mucha variación en sus datos por lo que se calculó la desviación estándar dando como resultado 2.57, el cual nos permite saber cual es el rango en el que se encuentra la mayor parte de los datos en comparación a la media; mientras que para la temperatura a la salida del tamiz existe una menor desviación estándar dando como resultado 1.17, ya que los datos eran menos dispersos en comparación a los datos de entrada.

El mínimo valor de temperatura de entrada que halló en la muestra representativa es de 102 °C, estando por arriba de lo recomendado; en cambio el valor más alto que se pudo alcanzar es de 116°C.

Al obtener temperaturas aproximadas a los 80 °C a la salida del tamiz, el condensador logró obtener en el producto final temperaturas menores a las que se tenían previstas en los cálculos, dando como resultados temperaturas aproximadas de 35° C.

La eficiencia del tamiz desde el punto de vista de retención de agua es de 80%, valor que consideramos aceptable para un fin didáctico, que se lo podría mejorar aumentando la temperatura de ingreso al tamiz.

A concentraciones mas bajas de etanol se requiere mayor cantidad de lecho, por lo que se ve reflejado en los datos de que a menor concentración de ingreso se comenzará a saturar más rápidamente como era de esperarse.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

A partir de los resultados obtenidos en las experimentaciones realizadas, así como las experiencias obtenidas en la realización del proyecto, hemos llegado a las siguientes conclusiones:

6.1. CONCLUSIONES

1. Se logró diseñar y construir una unidad que rompa el punto azeotrópico del sistema etanol-agua, por medio de adsorción con un tamiz molecular, obteniendo además concentraciones mayores de 99,5% en volumen, es decir de alcohol anhidro.
2. Mientras menor sea la concentración de alcohol de la alimentación, el tiempo en que se comience a saturar la zeolita será menor.
3. A mayor temperatura, se desempeña una mejor adsorción por el hecho de que las moléculas de etanol y de agua se logran separar de mejor manera, siempre y cuando esta no sobrepase de los 260°C, que es lo máximo que resiste la Zeolita 3A.
4. La regeneración de la zeolita se la realiza con el mismo alcohol anhidro en fase vapor que ha sido obtenido en la práctica, entrando por el tamiz a contracorriente para captar las moléculas de agua que han sido

retenidas en la zeolita, generalmente suele aplicarse vacío para la regeneración, sin embargo igual es posible efectuar dicho proceso sin presión de vacío sólo que demora más tiempo y se requiere mayor cantidad de etanol anhidro en comparación al sistema en vacío.

6.2. RECOMENDACIONES.

- 1.** Para mejor rendimiento de la unidad, es necesario operar con la caldera a 50 psig, de esta manera se tiene la seguridad de que la temperatura será mayor a 100°C.
- 2.** La línea de recirculación del tanque de alimentación no debe quedar en medio de dicho tanque, porque la turbulencia del flujo de la recirculación provoca burbujas e inestabilidad en la medición del rotámetro.
- 3.** Utilizar los Epp's como mascarilla y guantes térmicos en el momento de la práctica para la seguridad del estudiante y prevenir daños a la salud.
- 4.** Manipular el alcoholímetro con mucho cuidado y no colocarlo en el etanol cuando este se encuentre muy caliente (mayor a 45 °C).
- 5.** La regeneración de preferencia no debe realizarse a un caudal mayor a 0.45 gpm, con el fin de evitar la fluidización del lecho al ser en contracorriente.
- 6.** Acorde a los datos técnicos del intercambiador de calor, no debe excederse una temperatura mayor a 150 °C, la presión máxima que

recomendada para la carcasa es de 300 psi, y la presión máxima para los tubos interiores es de 150 psi.

7. En caso de que el etanol anhidro obtenido en las prácticas no sea suficiente, es preferible tener comprado etanol anhidro para el proceso de regeneración.
8. Es preferible no mantenerse cerca de la salida del condensado de la trampa de vapor debido a la alta temperatura del mismo, y además hay la posibilidad de que salga acumulado el condensado liberando así mayor cantidad de vapor.
9. No retirar las cañuelas de lana de vidrio que se colocaron en ciertas líneas del sistema, ya que su fin es el de proteger a los que manejen el equipo, evitando el contacto directo con alguna línea de proceso al momento de la recolección de muestra.

ANEXOS

Hoja de seguridad del tamiz molecular. Página (1/4)

GRACE Grace Davison

W. R. GRACE & Co.-Conn.
P. O. Box 2117
Baltimore, Maryland 21203
(410)531-4000

MATERIAL
SAFETY
DATA
SHEET

SAFETY
DATA

REF. NO. 2501

PRODUCT: Formed Molecular Sieve

DATE: June 15, 1998

Emergency Contact:

J. H. Convey, Manager Environmental Services Telephone No. (Home) 301-874-2009 (Office) 410-531-4000

The following information includes safety data required by OSHA. The recipient of this safety data is responsible for passing the safety information on so that it reaches the ultimate user who may come in contact with the material.

TRADE NAME: Formed Molecular Sieves
GRADES: 511, 511H, 512, 513, 513SGP, 514, 514SGP, 516, 518, 519, 521, 522, 542, 542HP, 544HP, 544XP, 544 C, 548, 562, 562CS, 564, 564CS, 562 OXS, 564 OXS, 514, 625, SNG - III, SZ-5, SZ-9, PSE, IGE, WZ-10, SNG-3, VSP-5

CHEMICAL NAME & FAMILY: Synthetic Zeolite, A-TYPE Sieves, X-TYPE Sieves, Y-TYPE Sieves

SYNONYMS: Sodium*, Calcium* or Potassium* Aluminosilicate
* Depending on product grade.

CHEMICAL NOTATION OR STRUCTURE:
A-TYPE: $\text{Na}_2\text{O}, \text{CaO}$ or $\text{K}_2\text{O}(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2.0\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O})$
X-TYPE: $\text{Na}_2\text{O}, \text{CaO}$ or $\text{K}_2\text{O}(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2.8\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O})$
Y-TYPE: $\text{Na}_2\text{O}, \text{CaO}$ or $\text{K}_2\text{O}(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5.0\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O})$
Clay: 3 MgO:1.5 Al₂O₃:8SiO₂:9H₂O

INGREDIENTS:

		Na ₂ O* Sodium Oxide	CaO* Calcium Oxide	K ₂ O* Potassium Oxide	SiO ₂ ** Silica (Synthetic)	Al ₂ O ₃ Alumina	Clay	Quartz
OSHA: PEL mg/m ³	total respirable	n.l.	5	n.l.	6	10	n.l.	0.1
ACGIH: TLV mg/m ³	total respirable	n.l.	2	n.l.	10	10	n.l.	0.1
CAS NO:		1313-59-3	1305-78-8	12136-45-7	7631-86-9	1344-28-1	1332-58-7	7732-18-5
RTECS NO:		WC480000	EW310000	TT379000	VV7320000	BK1200000	n.l.	VV7330000

n.l. = not listed

** Should not be confused with quartz, cristobalite or tridymite

TSCA: EPA has defined zeolites as complex chemical products consisting of silica (SiO₂) and alumina (Al₂O₃), in various proportions plus metallic oxides and certain cations. For purposes of TSCA, zeolites are statutory mixtures.

The information contained herein is based upon data considered true and accurate. However, Grace makes no warranty, express or implied, as to the accuracy or adequacy of the information contained herein or the results to be obtained from the use thereof. This information is offered solely for the user's convenience, investigation and verification. Since the use and condition of use of this information and the material described herein are not within the control of Grace, Grace assumes no responsibility for injury to the user or third parties. The material described herein is sold only pursuant to Grace's Terms and Conditions of Sale, including those limiting, reserving and redefining standard liability. It is the responsibility of the user to determine whether any use of this data and information is in accordance with applicable federal, state and local regulations.

REF. NO. 2501

Hoja de seguridad del tamiz molecular. Página (2/4)

HEALTH INFORMATION

PRECAUTION IN USE:

Avoid prolonged breathing of the dust or contact of dust with the skin. The drying action of this material can cause irritation of the mucous membranes of the nose and throat and irritation of the skin. If its use requires manual handling, wear long sleeves and close-weave cotton gloves with tight-fitting wristlets. If dusty conditions prevail, use of an approved NIOSH/MSHA dust mask is recommended.

When pouring into a container of flammable liquid, ground both containers electrically to prevent a static electric spark.

Will release heat when adsorbing water. If a large quantity of sieve quickly adsorbs the equilibrium amount of water, the sieves can become hot enough to cause thermal burns of the skin. Avoid contact under these conditions. See SPECIAL INFORMATION, p. 4.

FIRST AID:

EYES: Immediately wash from eyes with large amounts of water, occasionally lifting upper & lower eye lids. If irritation occurs and persists, seek medical attention.

SKIN: Wash with soap & water.

INGESTION: Material will pass through body normally.

INHALATION: Remove to fresh air.

TOXICOLOGY

ANIMAL TOXICOLOGY

TESTS FOR DOT HAZARD CLASSIFICATION:

Tests on Na₂O X-TYPE sieves gave the following results:

1-hour LC₅₀ (rat) > 2.8 mg/l

48-hour oral LD₅₀ (rat) est. > 31,600 mg/kg

48-hour dermal LD₅₀ (rabbit) est. > 2,000 mg/kg

Not considered an ocular irritant.

TESTS FOR FDA APPROVAL FOR USE IN FOODS:

Not a food-grade product.

HUMAN TOXICOLOGY:

Molecular Sieves are non-fibrous, synthetic aluminosilicates (zeolites) not to be confused with natural zeolites. All studies to date indicate that they do not cause significant health problems. When activated, molecular sieves act as a desiccant and can cause a drying irritation of the mucous membranes and skin in cases of severe exposure. The average concentration of quartz in this material is less 2.0% (maximum = 3.0%). Quartz has been classified by IARC as a Class 2A Carcinogen. Quartz can cause cancer, silicosis or other fibrotic lung disease with prolonged exposure. Davison knows of no medical conditions abnormally aggravated by exposure to this product. The primary route of entry is inhalation.

Hoja de seguridad del tamiz molecular. Página (3/4)

ENVIRONMENTAL DATA

Not known to have any adverse effect on the aquatic environment when properly disposed. Insoluble and nontoxic.

TYPICAL CHEMICAL & PHYSICAL INFORMATION

APPEARANCE: White, gray, or tan, beads.

pH IN 5% SLURRY: 10.3 - 10.5

ODOR: Odorless

SPECIFIC GRAVITY: 2.1

BULK DENSITY: Beaded Grades 40-50 lbs/ft.³

**SOLUBILITY
IN WATER:** Insoluble

**APPROXIMATE
ANALYSIS:** Mol ratios: A-TYPE: 1Na₂O:1Al₂O₃:2SiO₂:xH₂O
A-TYPE: 0.8CaO:0.2Na₂O:1.0Al₂O₃:2.0SiO₂:xH₂O
A-TYPE: 0.6K₂O:0.4Na₂O:1.0Al₂O₃:2.0SiO₂:xH₂O
X-TYPE: 1Na₂O:1Al₂O₃:2.8SiO₂:xH₂O
Y-TYPE: 1Na₂O:1Al₂O₃:5.0SiO₂:xH₂O
CLAY: 3MgO,1Al₂O₃,8SiO₂,9H₂O
Weight %: Quartz: < 2 (typical) Maximum = 3.0

STABILITY: Stable

REACTIVITY: Reacts with HF and strong acids or alkali

**FIRE & EXPLOSION
DATA:** Non-flammable

REGULATORY STATUS

OSHA- PEL: Molecular Sieve - not listed in 29 CFR 1910.1000. See page 1.

NIOSH- Not included on the list of substances requiring toxicity studies.

EPA- This product contains no toxic chemicals in excess of the applicable de minimis concentration as specified under § 313 of Title III SARA.

REF. NO. 2501

Hoja de seguridad del tamiz molecular. Página (4/4)

ACGIH- TLV: Molecular Sieve - not listed in ACGIH- TLV's. See page 1.

USDA- Not applicable.

FDA- Not applicable.

DOT- Not classified as a hazardous material.

HANDLING INFORMATION

STORAGE AND TRANSPORTATION:

Keep containers tightly sealed to protect product quality.

DISPOSAL:

Landfill in accordance with local, state and federal regulations. Cover to avoid blowing of dust. See Special Information, below.

SPILLAGE AND CLEANUP:

Vacuum or sweep up or flush to sewer treated for suspended solids removal.

CONTAINERS:

Bags and drum containers.
Also available in other packaging as required, including bulk shipments by truck.





SPECIAL INFORMATION

When transferring beaded molecular sieves with high pressure air, wear goggles. Malfunction of equipment can propel beads with enough velocity to penetrate the skin. Make sure that the transfer system and receiving vessels are properly grounded. Follow standard operating instructions.

Following contact with typical petrochemicals or gases, molecular sieves must be handled with special precautions. The combination of molecular sieves and retained material can be flammable and toxic. Care should be taken to avoid sources of ignition and to avoid personal contact. Use approved disposal methods suitable for toxic wastes.

Hoja de seguridad del Etanol Anhidro. Página (1/2)

Fichas Internacionales de Seguridad Química

ETANOL (ANHIDRO)		ICSC: 0044 Octubre 2000	
Alcohol etílico			
CAS:	64-17-5	CH ₃ CH ₂ OH / C ₂ H ₅ O	
RTECS:	KQ6300000	Masa molecular: 46.1	
NU:	1170		
CE Índice Anexo I:	603-002-00-5		
CE / EINECS:	200-578-6		
TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Altamente inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar. NO poner en contacto con oxidantes fuertes.	Polvo, espuma resistente al alcohol, agua en grandes cantidades, dióxido de carbono.
EXPLOSIÓN	Las mezclas vapor/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. NO utilizar aire comprimido para llenar, vaciar o manipular.	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.
EXPOSICIÓN			
Inhalación	Tos. Dolor de cabeza. Fatiga. Somnolencia.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo.
Piel	Piel seca.	Guantes de protección.	Quitar las ropas contaminadas. Aclarar y lavar con agua y jabón.
Ojos	Enrojecimiento. Dolor. Quemazón.	Gafas ajustadas de seguridad.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
Ingestión	Sensación de quemazón. Dolor de cabeza. Confusión. Vértigo. Pérdida del conocimiento.	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca. Proporcionar asistencia médica.
DERRAMES Y FUGAS	ENVASADO Y ETIQUETADO		
Ventilar. Eliminar toda fuente de ignición. Recoger, en la medida de lo posible, el líquido que se derrama y el ya derramado en recipientes herméticos. Eliminar el residuo con agua abundante.	Clasificación UE Símbolo: F R: 11 S: (2-)7-16 Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 3 Grupo de Envasado NU: II		
RESPUESTA DE EMERGENCIA	ALMACENAMIENTO		
Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-30S1170. Código NFPA: H 0; F 3; R 0;	A prueba de incendio. Separado de oxidantes fuertes.		
IPCS International Programme on Chemical Safety			
Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © IPCS, CE 2005			

Hoja de seguridad del Etanol Anhidro. Página (2/2)

ETANOL (ANHIDRO)

ICSC: 0044

DATOS IMPORTANTES

ESTADO FÍSICO; ASPECTO:
Líquido incoloro, de olor característico.

PELIGROS FÍSICOS:
El vapor se mezcla bien con el aire, formándose fácilmente mezclas explosivas.

PELIGROS QUÍMICOS:
Reacciona lentamente con hipoclorito cálcico, óxido de plata y amoníaco originando peligro de incendio y explosión. Reacciona violentamente con oxidantes fuertes tales como ácido nítrico, nitrato de plata, nitrato de mercurio o perclorato magnésico, originando peligro de incendio y explosión.

LÍMITES DE EXPOSICIÓN:
TLV: 1000 ppm (como TWA), A4 (no clasificable como cancerígeno humano) (ACGIH 2004).
MAK: 500 ppm; 960 mg/m³; Categoría de limitación de pico: III(2),
Cancerígeno: categoría 5, Mutágeno: categoría 5, Riesgo para el embarazo: grupo C (DFG 2004).

VÍAS DE EXPOSICIÓN:
La sustancia se puede absorber por inhalación del vapor y por ingestión.

RIESGO DE INHALACIÓN:
Por evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar bastante lentamente una concentración nociva en el aire.

EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN:
La sustancia irrita los ojos. La inhalación de altas concentraciones del vapor puede originar irritación de los ojos y del tracto respiratorio. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central.

EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA:
El líquido desengrasa la piel. La sustancia puede afectar al tracto respiratorio superior y al sistema nervioso central, dando lugar a irritación, dolor de cabeza, fatiga y falta de concentración. Ver Notas.

PROPIEDADES FÍSICAS

Punto de ebullición: 79°C
Punto de fusión: -117°C
Densidad relativa (agua = 1): 0,8
Solubilidad en agua: miscible
Presión de vapor, kPa a 20°C: 5,8
Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1,6

Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1,03
Punto de inflamación: 13°C c.e.
Temperatura de autoignición: 363°C
Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 3.3-19
Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: -0.32

DATOS AMBIENTALES

NOTAS

El consumo de etanol durante el embarazo puede afectar al feto. La ingesta crónica de etanol puede causar cirrosis hepática. El punto de inflamación de la disolución acuosa al 50% es 24°C. Esta ficha ha sido parcialmente actualizada en abril de 2005: ver Límites de exposición.

INFORMACIÓN ADICIONAL

Límites de exposición profesional (INSHT)

VLA-EC: 1000 ppm; 1910 mg/m³

Notas: Esta sustancia tiene prohibida tota



Grados de NFPA: Salud: 0 inflamabilidad: 3 reactividad: 0 **osanitario y/o biocida.**

Nota legal

Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.

© IPCS, CE 2005



Figura 63. Intercambiadores de calor antes de darle mantenimiento.

Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.)



Figura 64. Súper Heat antes del mantenimiento.

Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.)



Figura 67. Pruebas para verificación de fugas en el Tamiz molecular
Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.)



Figura 65. Realizando ajustes en el Tamiz. **Fuente:** (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.)



Figura 66. Preparando tamiz molecular para montarlo. **Fuente:** (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.)



Figura 68.Tamiz molecular pintado.
Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.)



Figura 69.Bridas del tamiz molecular pintadas.
Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.)



Figura 72. Unidad deshidratadora de etanol finalizada. **Fuente:** (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.)



Figura 71. Colocando la Zeolita en el tamiz molecular. **Fuente:** (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.)



Figura 70. Realizando el montaje de la unidad deshidratadora. **Fuente:** (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.)

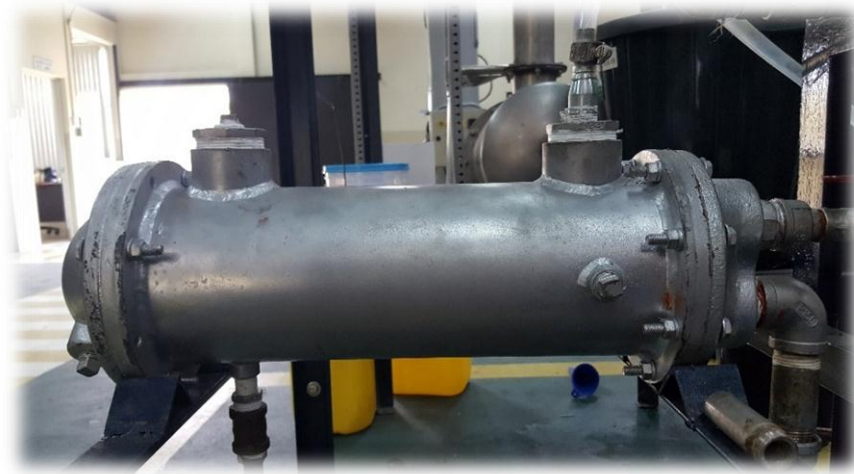


Figura 75. Condensador montado. **Fuente:** (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.)



Figura 74. Tamiz molecular montado. **Fuente:** (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.)



Figura 73. Súper calentador montado. **Fuente:** (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.)



Figura 76. Aislado la línea de vapor que se conectan a nuestro equipo. **Fuente:** (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.)



Figura 78. Realizando las pruebas en la unidad deshidratadora de etanol. **Fuente:** (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.)



Figura 77. Obtención de etanol anhidro. **Fuente:** (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.)

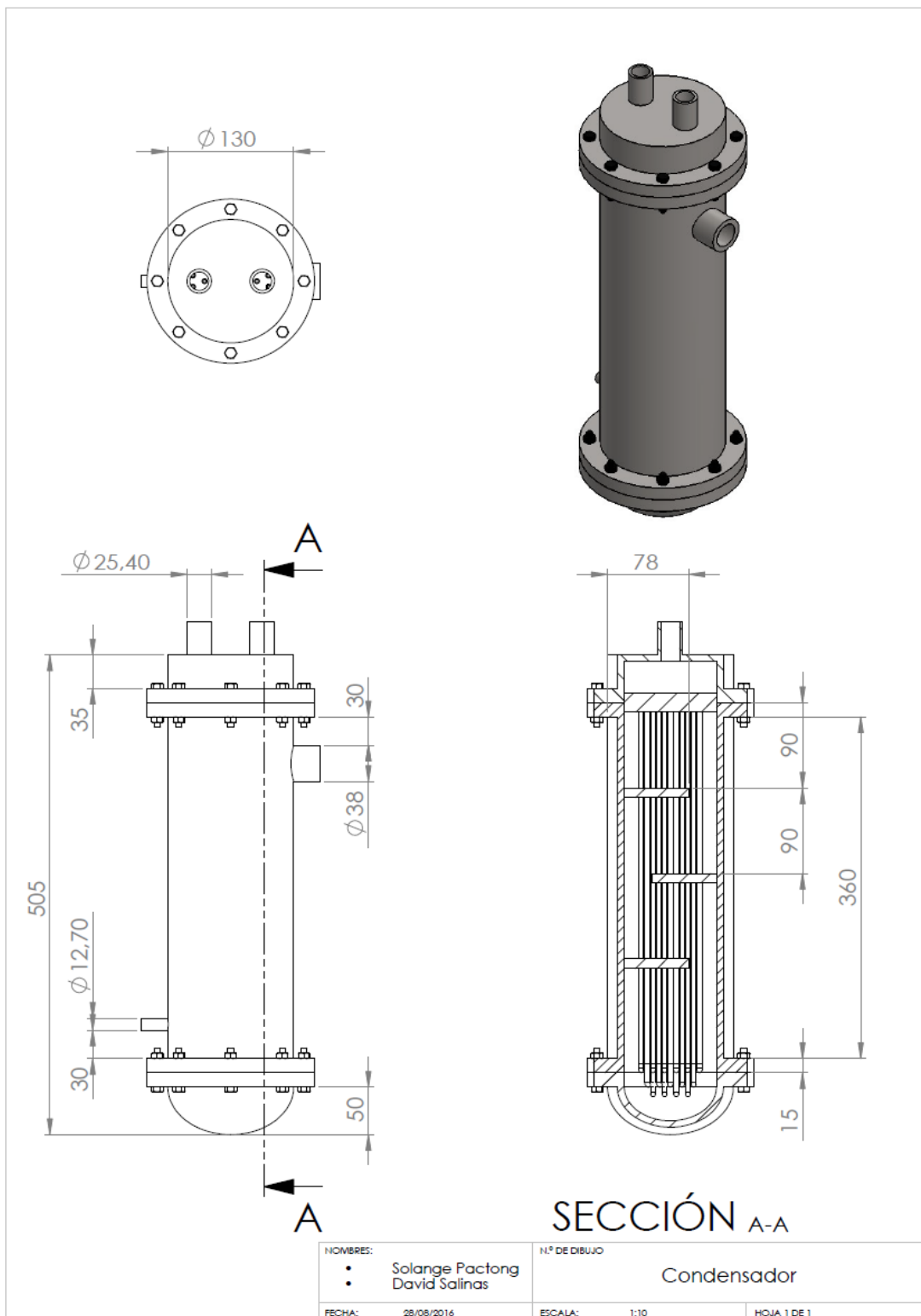


Figura 79. Diseño interior y exterior del condensador.

Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.)

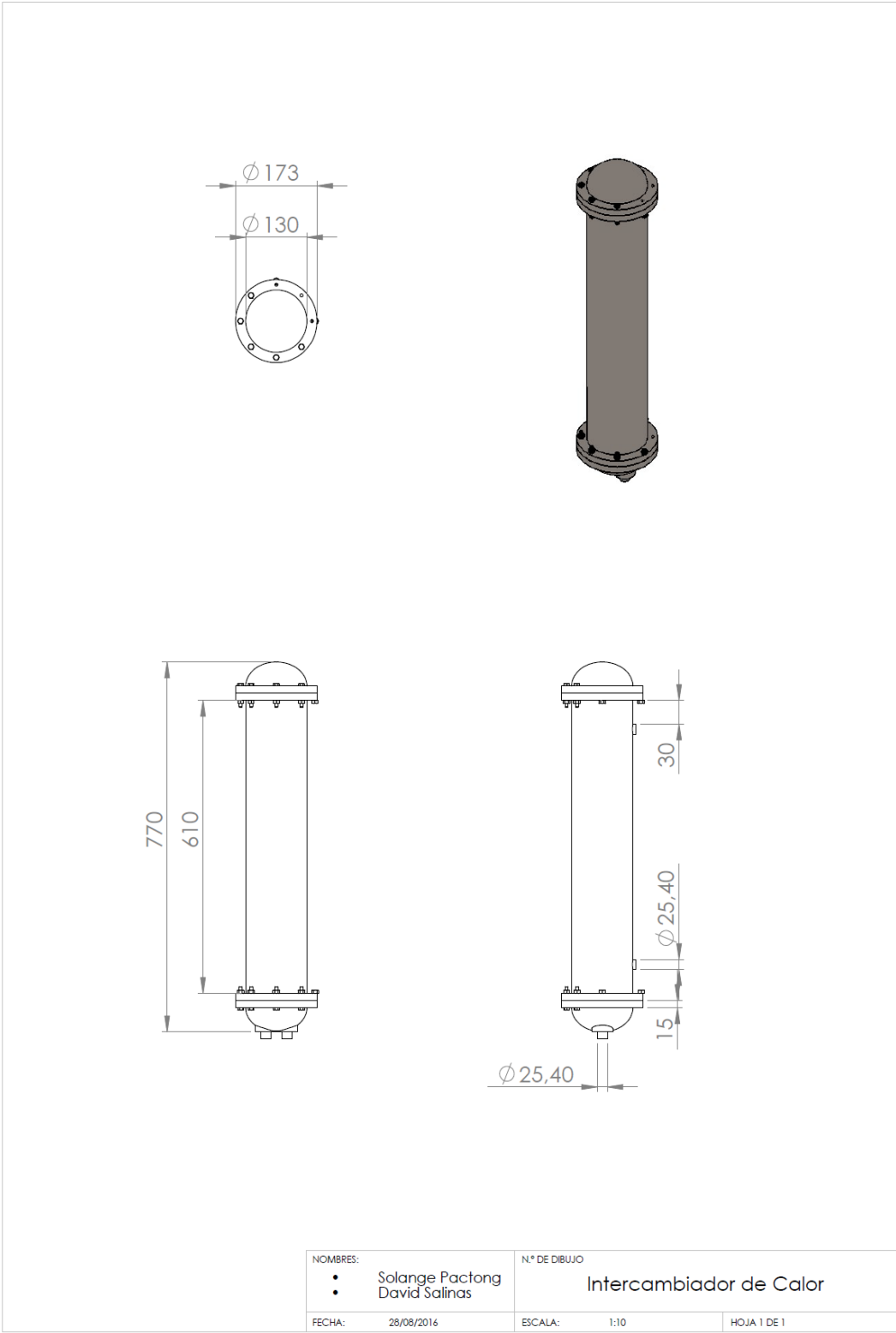


Figura 80. Diseño interior y exterior del intercambiador de calor.

Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.)

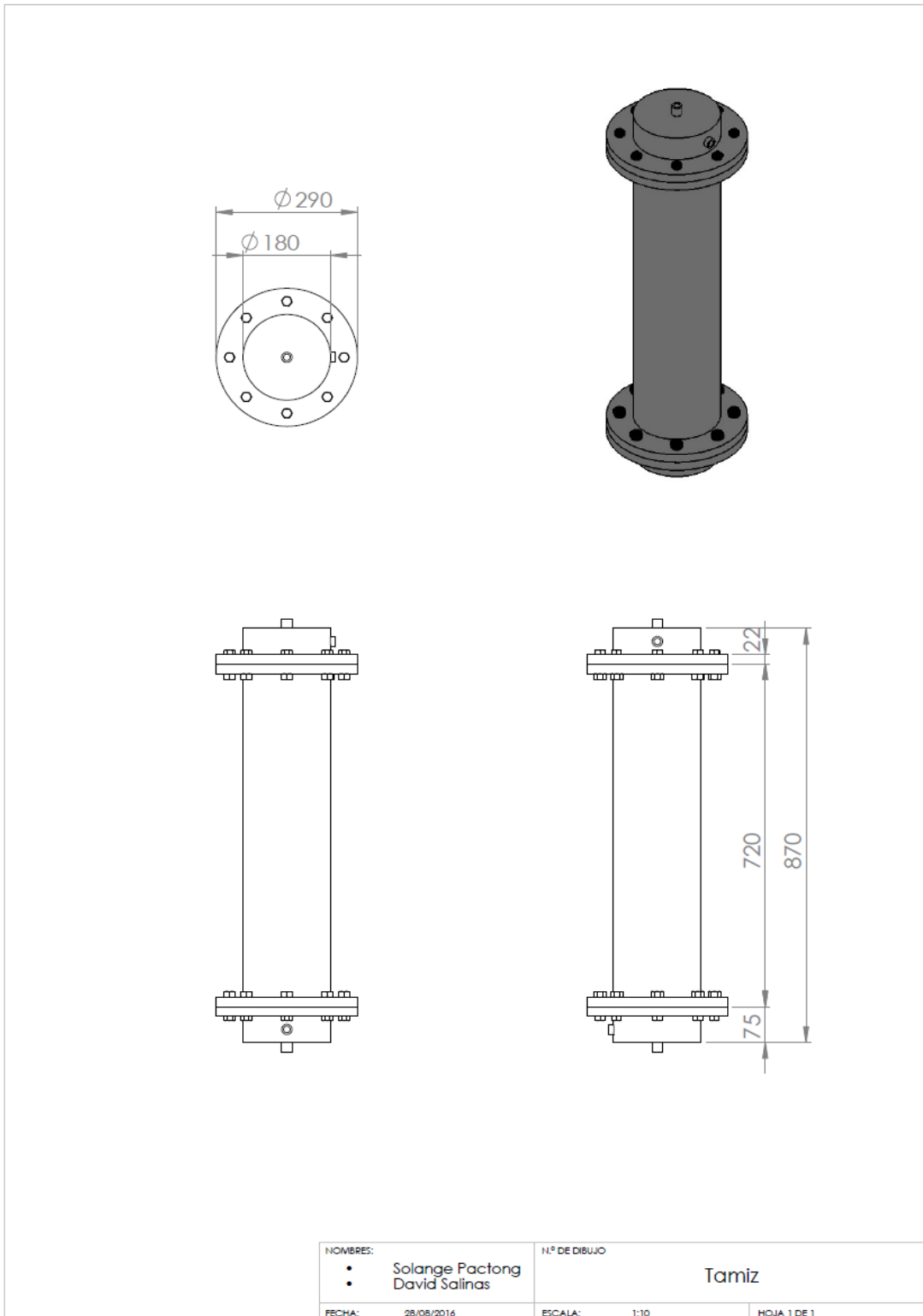


Figura 81. Diseño interior y exterior del Tamiz molecular.

Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.)

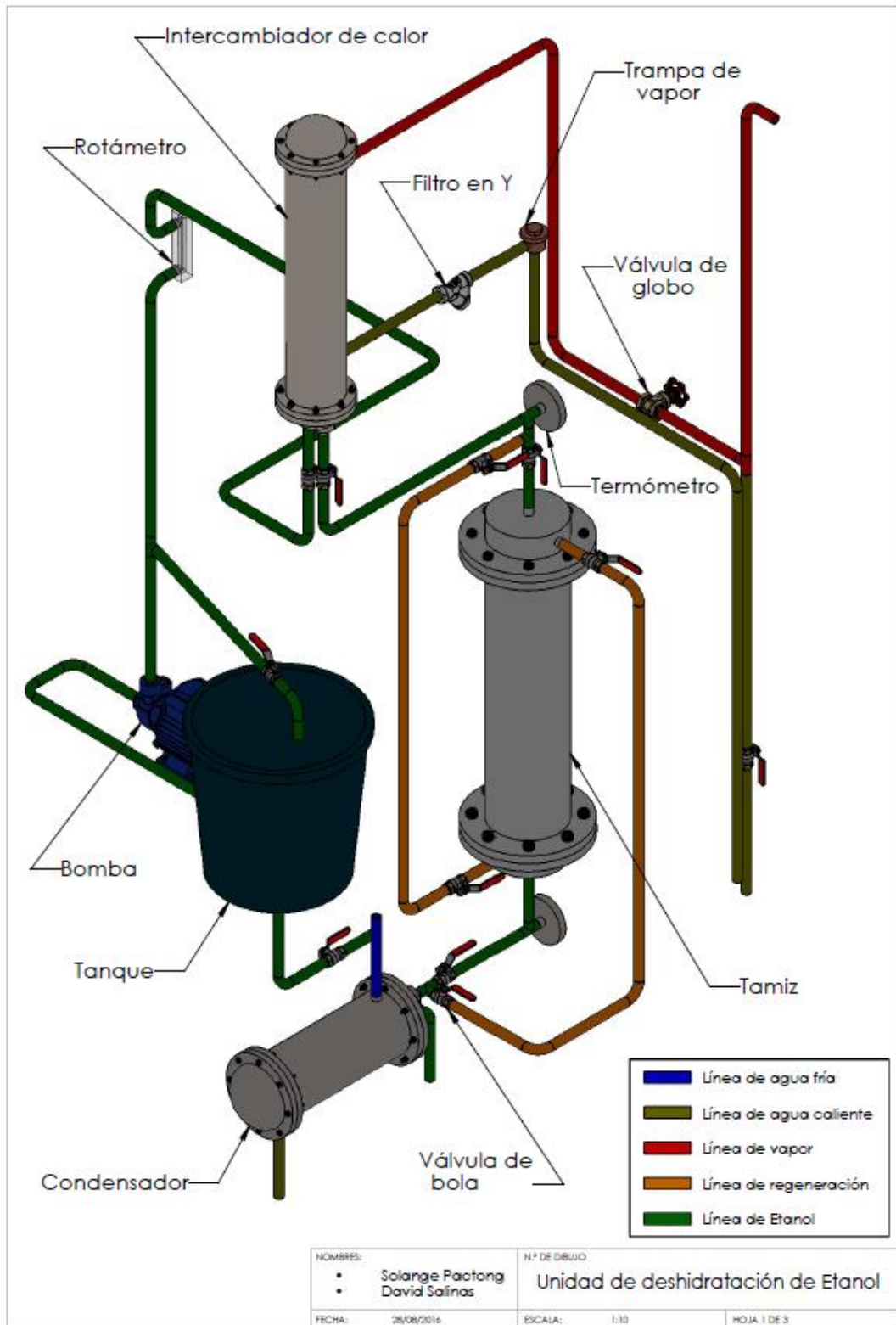


Figura 82.Esquema en 3D de la unidad deshidratadora de Etanol, vista Frontal.

Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.)

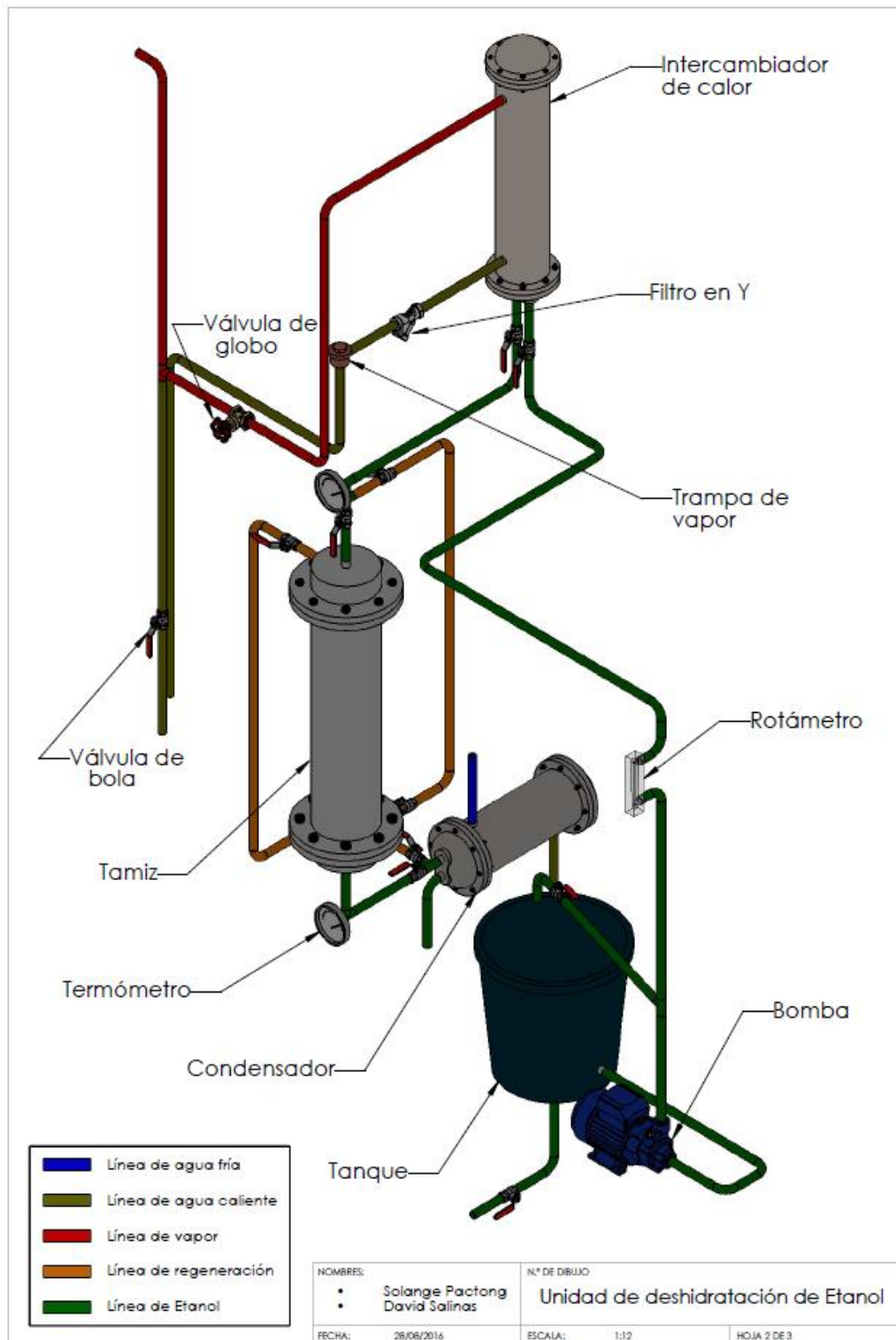


Figura 83. Esquema en 3D de la unidad deshidratadora de Etanol, vista posterior.

Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.)

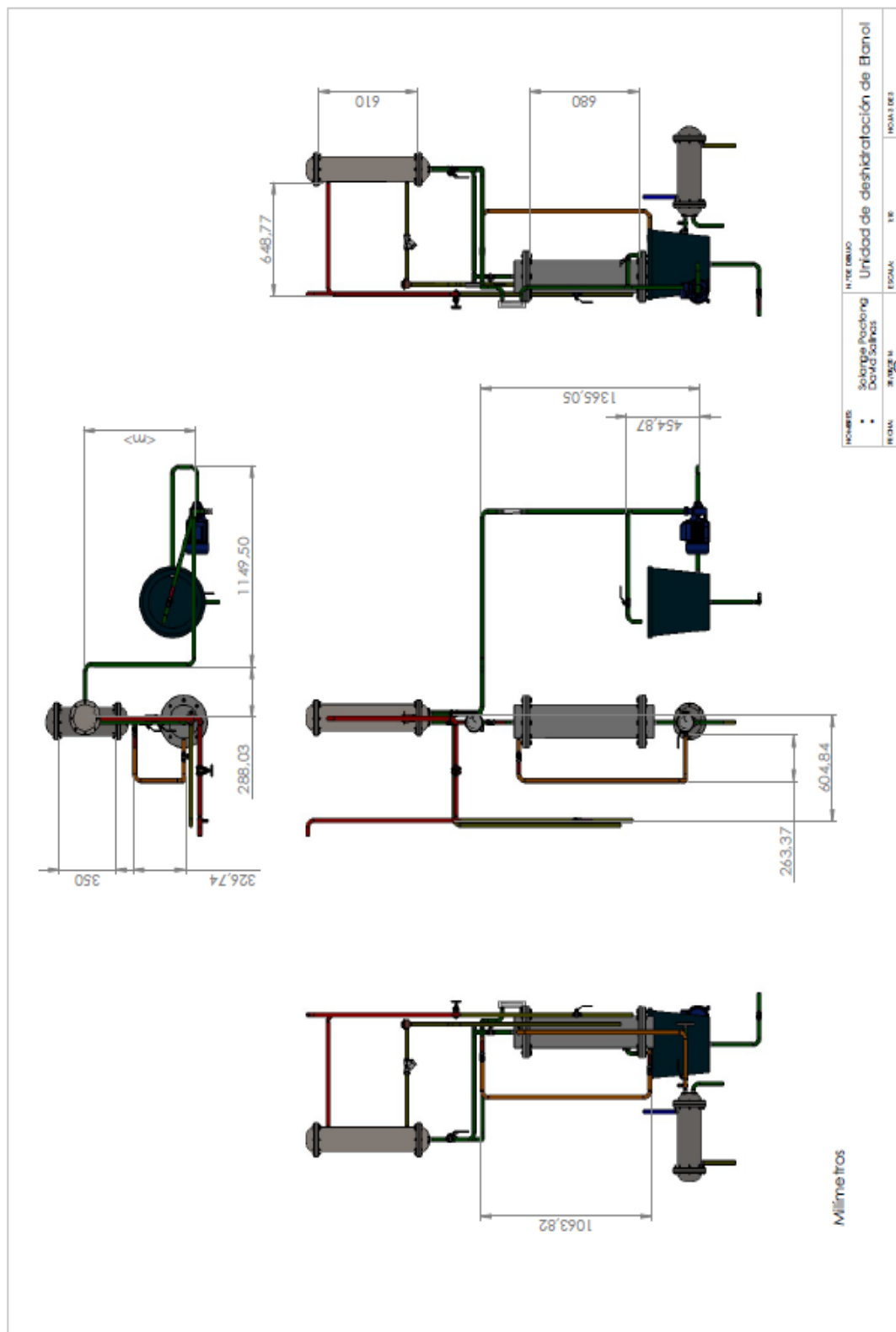


Figura 84.Esquema en 3D de la unidad deshidratadora de Etanol, 4 vistas
Fuente: (Pactong, Solange; Salinas, Marcelo.)

Caños diámetro exterior nominal con costura								
TP 304 - 304L - 316L - Según Norma ASTM A312 - A409 - A778								
Terminación Decapado y Pasivado, superficie lisa Aplicación Conducción en altas y bajas temperaturas y en ambientes corrosivos Largo estándar: 6000 mm Dimensiones según ANSI B 36.19 y ANSI B 36.10	Diámetro ext. (d)		Espesor de Pared (s)					
	Pulgadas	mm.	sch 5S	kg./mt.	sch10S	kg./mt.	sch 40S	kg./mt.
	1/8"	10.3				0.280	1.73	0.370
	1/4"	13.75			1.65	0.510	2.24	0.670
	3/8"	17.2			1.65	0.660	2.31	0.880
	1/2"	21.5	1.65	0.817	2.11	1.040	2.77	1.330
	3/4"	26.6	1.65	1.038	2.11	1.330	2.87	1.750
	1"	33.4	1.65	1.317	2.77	2.170	3.38	2.590
	1"1/4	42.2	1.65	1.671	2.77	2.770	3.56	3.500
	1"1/2	48.3	1.65	1.933	2.77	3.200	3.69	4.170
	2"	60.3	1.65	2.433	2.77	4.040	3.91	5.590
	2"1/2	73	2.11	3.761	3.05	5.340	5.16	8.860
	3"	88.9	2.11	4.602	3.05	6.540	5.49	11.052
	3"1/2	101.6	2.11	5.248	3.05	7.514	5.74	13.900
	4"	114.3	2.11	5.949	3.05	8.6640	6.02	16.840
	5"	141.3	2.77	9.644	3.40	11.820	6.55	22.260
	6"	168.3	2.77	11.522	3.40	14.130	7.11	26.080
	8"	219.1	2.77	15.066	3.76	20.390	8.18	43.560
	10"	273.1	3.40	22.092	4.19	28.163	9.27	61.131
	12"	323.8	3.97	31.837	4.57	36.677	9.53	74.811
	14"	355.6	3.97	34.812	4.78	41.923	11.13	82.367
	16"	406.4	4.2	42.131	4.78	47.994	12.70	94.457

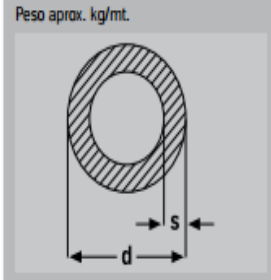


Figura 85. Especificaciones de Tubería de acero inoxidable.

Fuente: (Fortinox S.A., 2013). Disponible en:
<http://www.fortinox.com/pdf/GuiaAcerosInoxidables.pdf>

TIPO ACR						
Diámetro Exterior		Espesor de pared		Peso		Presión de trabajo
pulg.	mm	pulg.	mm	kg/m	kg/rollo	PSI a 38°C
1/8	3,18	0,030	0,76	0,052	0,792	3.130
3/16	4,76	0,030	0,76	0,086	1,311	1.990
1/4	6,35	0,030	0,76	0,120	1,829	1.450
5/16	7,94	0,032	0,81	0,162	2,469	1.230
3/8	9,53	0,032	0,81	0,199	3,033	1.010
1/2	12,70	0,032	0,81	0,271	4,130	740
5/8	15,87	0,035	0,89	0,373	5,685	640
3/4	19,05	0,035	0,89	0,454	6,919	520
7/8	19,05	0,042	1,06	0,539	8,214	650
1	22,22	0,045	1,14	0,677	10,317	595



Nota: Se designa por su diámetro exterior real, es decir, el tubo de 1/2 pulgada tiene un diámetro exterior real de 1/2 pulgada, y así sucesivamente.

TIPO K							TIPO L				TIPO M			
Diámetro Nominal	Diámetro Exterior*		Espesor de pared		Peso teórico	Presión de trabajo	Espesor de pared		Peso teórico	Presión de trabajo	Espesor de pared		Peso teórico	Presión de trabajo
pulg.	pulg.	mm	pulg.	mm	kg/m	PSI a 38°C	pulg.	mm	kg/m	PSI a 38°C	pulg.	mm	kg/m	PSI a 38°C
1/4	3/8	9,52	0,035	0,89	0,216	1,595	0,032	0,81	0,199	1,350	–	–	–	–
3/8	1/2	12,70	0,049	1,24	0,400	1,745	0,035	0,89	0,295	1,195	0,025	0,63	0,216	840
1/2	5/8	15,87	0,049	1,24	0,512	1,375	0,040	1,02	0,424	1,105	0,028	0,71	0,304	760
5/8	3/4	19,05	0,049	1,24	0,622	1,135	0,042	1,07	0,539	965	–	–	–	–
3/4	7/8	22,22	0,065	1,65	0,954	1,315	0,045	1,14	0,677	875	0,032	0,81	0,488	610
1	1 1/8	28,57	0,065	1,65	1,249	1,010	0,050	1,27	0,975	770	0,035	0,89	0,692	515
1 1/4	1 3/8	34,92	0,065	1,65	1,548	820	0,055	1,40	1,316	680	0,042	1,07	1,015	515
1 1/2	1 5/8	41,27	0,072	1,83	2,024	765	0,060	1,52	1,687	630	0,049	1,24	1,399	510
2	2 1/8	53,97	0,083	2,11	3,066	665	0,070	1,78	2,604	555	0,058	1,47	2,173	450
2 1/2	2 5/8	66,67	0,095	2,41	4,360	520	0,080	2,03	3,691	520	0,065	1,65	3,021	410
3	3 1/8	79,37	0,109	2,77	5,953	605	0,090	2,29	4,956	490	0,072	1,83	3,988	385
3 1/2	3 5/8	92,07	0,120	3,05	7,619	570	0,100	2,54	6,384	470	0,083	2,11	5,328	385
4	4 1/8	104,77	0,134	3,40	9,688	555	0,110	2,79	8,006	450	0,095	2,41	6,935	380

Figura 86. Especificaciones de Tubería de Cobre.

Fuente:(CobreGlobal, n.d.). Disponible en:
http://www.cobreglobal.com/images/pdf/CGL016_Catalogo.aspx



MODELO	3312XX	5312XX
Diámetro de la carátula	3" (76.2 mm)	5" (127.0 mm)
Posición del vástago	Ángulo variable	
Rosca de conexión	1/2" NPT	
Caja y bisel	Acero inoxidable 304, resistencia a la corrosión, sello hermético entre el medio exterior y el conjunto interno del termómetro.	
Carátula	De aluminio resistente a la corrosión con acabado color blanco.	
Exactitud	Garantizados con exactitud de +/-1% a escala total.	
Vástago	De acero inoxidable 316L de 1/4" de diámetro con longitudes según tabla selectiva (2 1/2", 4", 6", 9", 12", 15", 18", 24")	
Alcance de medición	Escala sencilla en °C o duales en °C y °F. Ver tabla selectiva (-50°C hasta 500°C)	

Alcance de medición de temperatura

Longitud del vástago

Longitud	Código
2 1/2"	02
4"	04
6"	06
9"	09
12"	12
15"	15
18"	18
24"	24

(Para otras longitudes, consulte a planta).

Escala sencilla °C			Escala dual		
Alcance de Medición °C	Código		Alcance de Medición °F	Alcance de Medición °C	Código
-50 a 50	8 2		-5 a 240	-20 a 120	9 4
-20 a 120	8 3				
0 a 120	8 4		30 a 300	0 a 150	9 5
0 a 150	8 5				
0 a 250	8 6				
0 a 300	8 7				
100 a 500	8 9				

Utilice siempre sus termómetros a un 75% de su capacidad, considerando como 100% el alcance máximo de medición indicado en la carátula.

(Para otros rangos de temperatura consulte a planta).

Para convertir de Fahrenheit a Celsius (Centígrados)

$$(^{\circ}\text{F} - 32) \times \frac{5}{9} = ^{\circ}\text{C}$$

$$(^{\circ}\text{F} - 32) \times 0.55 = ^{\circ}\text{C}$$

Ejemplo:

$$\frac{212^{\circ}\text{F} - 32}{9} \times 5 = 100^{\circ}\text{C}$$

Para convertir de Celsius a Fahrenheit :

$$^{\circ}\text{C} \times \frac{9}{5} + 32 = ^{\circ}\text{F}$$

$$5 \times (^{\circ}\text{C} \times 1.8) + 32 = ^{\circ}\text{F}$$

Ejemplo:

$$100^{\circ}\text{C} = \frac{100 \times 9}{5} + 32 = 212^{\circ}\text{F}$$

Diámetro de carátula	Conexión	A	B	L = longitud de vástago
2" (50.8 mm)	1/4 NPT	2 5/16" (58.38 mm)	17/32" (13.49 mm)	La especificada
3" (76.2 mm)	1/2 NPT	3 9/32" (89.3 mm)	3/4" (19 mm)	La especificada
5" (127 mm)	1/2 NPT	5 9/32" (134.14 mm)	3/4" (19 mm)	La especificada

TORNILLO DE CALIBRACION PARA 3" Y 5"

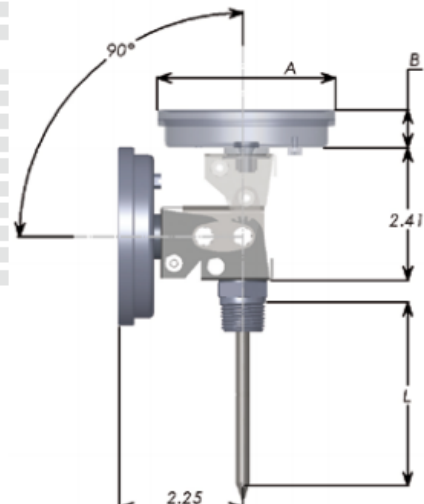
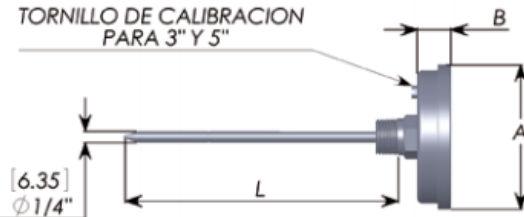


Figura 87. Especificaciones del termómetro con vástago.

Fuente: (Metron, 2011). Disponible en: <http://dominion.com.mx/fichas/termometro-metron-313.pdf>

Features:

- Copper & Steel Construction
- Optional Non-Ferrous Construction
- Competitively Priced
- 1/4" or 3/8" Tubes Standard
- Air to Water Applications
- NPT or SAE O-Ring Shell Side Connections Available
- End Bonnets Removable for Servicing
- Mounting Feet Included (May be Rotated in 90° Increments)

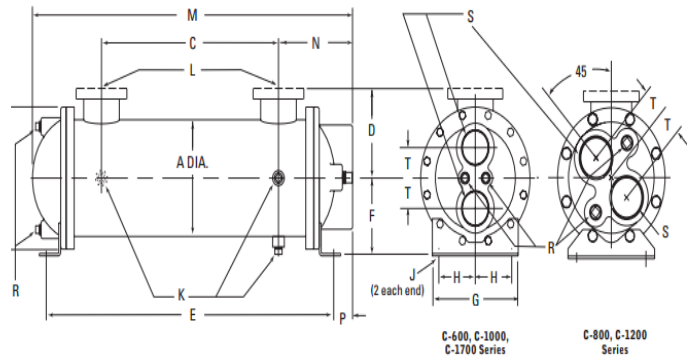


Ratings:

- Maximum Shell Pressure: 300 psi
- Maximum Tube Side Pressure 150 psi
- Maximum Temperature 300° F

Materials:

- Tubes Copper
- Hubs & Tubesheets Steel
- Shell Steel
- Baffles Brass
- End Bonnets Cast Iron
- Mounting Brackets Steel
- Gaskets Nitrile Rubber/Cellulose Fiber
- Nameplate Aluminum Foil



MODEL SIZE	A	B	C	D		E	F	G	H	J	K NPT	L		M	N	P	R NPT	S NPT/BSPP	T
				NPT/BSPP SAE O-RING	SAE FLANGE							NPT/BSPP FLANGE	SAE O-RING						
614	3.25	4.50	10.00	2.62	2.88	16.38	2.75	4.18	1.62	.44	(3)	1.00	#16 15/16-12 UNF-2B	17.12	3.56	.38	(2)	1.00	1.00
624			20.00			26.38								27.12					
814	4.25	6.00	9.00	3.25	3.50	16.62	3.50	4.25	1.75	.50	(3)	1.50	#24 1 7/8-12 UN-2B	17.88	4.44	.63	(4)	1.25	1.06
824			19.00			26.62								27.88					
836			31.00			38.62								39.88					
1014	5.25	6.75	9.00	3.75	4.00	17.12	4.00	5.25	2.00	.75	(3)	2.00	#32 2 1/2-12 UN-2B	18.62	5.00	.94	(4)	1.50	1.50
1024			19.00			27.12								28.62					
1036			31.00			39.12								40.62					
1224			18.25			27.13								29.02					
1236	6.25	7.75	30.25	4.25	4.88	39.13	4.50	6.25	2.50	.38	(3)	3.00	#32 2 1/2-12 UN-2B	41.03	5.43	1.00	(4)	2.00	1.56
1248			42.25			51.13								53.03					
1260			54.25			63.13								65.03					
1724	8.62	10.50	17.00	5.84	6.81	27.50	5.75	8.25	3.50	.62	(3)	3.00	-	30.62	7.06	1.81	(4)	2.50	2.25
1736			29.00			39.50								42.62					
1748			41.00			51.50								54.62					
1760			53.00			63.50								66.62					
1772			65.00			75.50								78.62					

Figura 88. Especificaciones de los intercambiadores de calor.

Fuente: (Southwest Thermal, 2015). Disponible en: <http://www.industrialheattransfer.com/quincyaftercoolers/quincyoilcoolers.html>

REFERENCIAS.

- [1] “Etanol - EcuRed.” [Online]. Available: <http://www.ecured.cu/Etanol>.
- [2] “Alcoholes,” 2012. [Online]. Available: <http://grupo-alcoholes.blogspot.com/>.
- [3] Industriales en Balanceo S.A., “Industria del Etanol.” [Online]. Available: <http://www.evisaventiladores.com/evisaweb/ventiladores/etanol.htm>.
- [4] Quiminet, “Los principales usos y aplicaciones del alcohol etílico | QuimiNet.com,” 2011. [Online]. Available: <http://www.quiminet.com/articulos/los-principales-usos-y-aplicaciones-del-alcohol-etilico-2643852.htm>. [Accessed: 15-Jul-2016].
- [5] ETALMAG, “Alcohol Anhidro,” 2012. [Online]. Available: <http://etalmag.com/alcoholanhidro.html>.
- [6] G. Carlos, “Bioetanol.”
- [7] P. (Instituto de promoción de exportaciones e inversiones) ECUADOR, “Biocombustibles,” 2013.
- [8] J. R. B. John Metcalfe Coulson, J. F. Richardson, *Ingeniería química: Operaciones básicas Google Books*. 2003.
- [9] C. Judson King, *Procesos de separación*, 1ra edició. California, 1979.
- [10] I. Aguilar, J. Rodríguez, and G. Caicedo, “PRODUCCION DE

ALCOHOL CARBURANTE POR DESTILACIÓN AZEOTRÓPICA
HOMOGÉNEA CON GLICERINA.”

- [11] A. M. Uyazán, I. D. Gil, J. L. Aguilar, G. Rodríguez, and L. A. Caicedo, “Deshidratación del etanol,” vol. 24, no. 3, pp. 49–59, 2004.
- [12] V. Monesterolo, R. B. Tutor, M. Luis, and A. Toselli, “APLICACIÓN DE LA SIMULACIÓN AL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DE ALCOHOL ETÍLICO POR PERVAPORACIÓN,” 2008.
- [13] J. A. López, J. Herlendy, and L. Salgado, “OBTENCION DE ETANOL ANHIDRO A PARTIR DE UN PROCESO DE DESTILACIÓN CON ADICIÓN DE ELECTROLITOS,” 2005.
- [14] R. H. C. Warren L. McCabe, Julian C. Smith, Peter Harriot, “Operaciones unitarias en ingeniería química,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [15] C. J. Geankoplis, *PROCESOS DE TRANSPORTE Y OPERACIONES UNITARIAS*, 3ra edició., no. 9. México, 1998.
- [16] M. Rodas, “TECTOSILICATOS ZEOLITAS.”
- [17] F. Morante, V. Ramos, J. Montalván, and J. Guerrero, “Obtención de Zeolita Sintética Clinoptilolita en Condiciones de Laboratorio,” vol. 18, 2005.
- [18] M. Magnin, “La Zeolita, Un Suplemento Mineral Depurativo,” 2009.

[19] "Capítulo 2, Zeolitas."

[20] GORDES ZEOLITE, "ZEOLITE (CLINOPTILOLITE)," 2014. [Online].

Available: <http://www.gordeszeolite.com/zeolite--clinoptilolite->.