



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA RECUPERACIÓN DE  
PERCLOREILENO MEDIANTE EL MÉTODO DE  
DESTILACIÓN EN INDUCALSA”**

**TESIS DE GRADO**  
**Previo a la obtención del Título de:**  
**INGENIERO QUÍMICO**

**AUTOR: WILINGTON EDUARDO ANDRADE HOYOS**  
**TUTOR: ING. HANNIBAL BRITO**

**RIOBAMBA – ECUADOR**

**2015**

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por la vida, la fortaleza, el amor y la esperanza en cada día que transcurre, y me permite culminar esta etapa académica.

A mis abuelos y padres; Dolores Hoyos y Cristóbal Hoyos, Lindeya Hoyos y Carlos Andrade por todo su apoyo, consejos y confianza depositada durante mi carrera estudiantil.

A mis hermanos; Over Andrade y Luis Andrade por hacerme parte de sus momentos de alegrías y tristezas que nos ayudaron a entendernos mejor y establecer una mejor unión para compartir y ser mejores en cada día.

Al Ing. Hanníbal Brito por su aporte científico en el desarrollo del presente proyecto de tesis, y a lo largo de mi vida estudiantil como un formador de conocimiento en las aulas.

Al Ing. Hugo Calderón quien desde el aula de clases como docente y fuera de ella como un amigo me ha guiado para ser un buen profesional transmitiendo sus enseñanzas y anécdotas de la Vida.

A la Ing. Mónica Andrade quien ha sido un mi vida estudiantil una promotora de aliento de los esfuerzos que se realiza como estudiante, a la Lic. Adriana Villena quien se ha ganado mi aprecio y cariño en su actividad laboral.

A la Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, que fue mi segundo hogar durante esta etapa de formación profesional.

A INDUCALSA por permitir desarrollar y aplicar el conocimiento obtenido en los periodos educativos y así contribuir al desarrollo de nuestra capacidad intelectual y por ende a la sociedad.

A los familiares, Ingenieros y amigos, quienes formaron parte de este sueño ya cumplido.

Estoy agradecido con Dios por permitirme un suspiro en la vida de tanta eternidad.

**WILINGTON EDUARDO ANDRADE HOYOS**

## **DEDICATORIA**

A mis abuelos y padres, Dolores Hoyos y Cristóbal Hoyos, Lindeya Hoyos y Carlos Andrade por su apoyo inculcando en mí el deseo de superación con el cual emprendí este viaje que ha culminarlo exitosamente por su gran esfuerzo y dedicación, por enseñarme que todo en la vida tiene un valor, una decisión puede cambiar la vida, un ejemplo puede ser mejor que un consejo y que una oportunidad es la simple realidad de ser mejores pero que un solo sentimiento nos recuerda que somos humanos, con recuerdos, sensaciones y el deseo de vivir al lado de quienes hacen su vida parte de nuestra vida

A mis hermanos Over Andrade y Luis Andrade por todo lo compartido durante nuestra amistad y unión familiar.

A mis amigos; Eyder, Cristian Patiño, Andrés Ocampo, Teobaldo Patiño, Paul Oviedo quienes con cada acción hemos crecido juntos para ser mejores personas.

WILINGTON EDUARDO ANDRADE HOYOS

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**

El tribunal de tesis certifica que: El trabajo de investigación “**DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA RECUPERACIÓN DE PERCLOREILENO MEDIANTE EL MÉTODO DE DESTILACIÓN EN INDUCALSA**”, de responsabilidad del señor Wilington Eduardo Andrade Hoyos ha sido prolijamente revisado por los Miembros del Tribunal de Tesis, quedando autorizado su presentación.

<b>NOMBRE</b>	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Dra. Nancy Veloz <b>DECANA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS</b>	.....	.....
Dr. Marcelo Ramos <b>DIRECTOR DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA</b>	.....	.....
Ing. Hannibal Brito M. PhD. <b>DIRECTOR DE TESIS</b>	.....	.....
Ing. Hugo Calderón <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>	.....	.....
Ab. Bertha Quintanilla <b>COORDINADOR SISBIB ESPOCH</b>	.....	.....
<b>NOTA DE TESIS</b>	.....	

“Yo, WILINGTON EDUARDO ANDRADE HOYOS, soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el presente proyecto; y el patrimonio de la Tesis de Grado pertenece a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO”

WILINGTON EDUARDO ANDRADE HOYOS

## INDICE DE CONTENIDOS

	pp.
INDICE DE ANEXOS	i
INDICE DE CUADROS	ii
INDICE DE GRAFICOS	iii
INDICE DE TABLAS	iv
RESUMEN	v
SUMARY	vi
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPITULO I</b> .....	6
1 <b>MARCOTEÓRICO</b> .....	6
1.1 <b>Inducalsa</b> .....	6
1.1.1 <i>Diagrama de flujo del proceso de fabricación de zapatos</i> .....	6
1.1.2 <i>Diagrama de flujo del proceso de fabricación de suelas</i> .....	7
1.1.3 <i>Suelas de poliuretano</i> .....	7
1.1.4 <i>Lavado de suelas PU</i> .....	8
1.2 <b>Solventes</b> .....	8
1.2.1 <b>Tipos de solventes</b> .....	8
1.2.1.1 <i>Agua</i> .....	8
1.2.1.2 <i>Solventes orgánicos</i> .....	8
1.2.1.3 <i>Solventes polares</i> .....	8
1.2.1.4 <i>Solventes apolares</i> .....	9
1.2.1.5 <i>Solventes alternativos</i> .....	9
1.2.1.6 <i>Percloroetileno</i> .....	9
1.2.1.6.1 <i>Datos del percloroetileno</i> .....	10
1.2.1.6.2 <i>Propiedades Físico - químicas del percloroetileno</i> .....	10
1.2.1.6.3 <i>Síntesis del percloroetileno</i> .....	10
1.2.1.6.4 <i>Reactividad</i> .....	10
1.2.1.6.5 <i>Usos del percloroetileno</i> .....	10
1.2.1.6.6 <i>Toxicidad</i> .....	11
1.2.1.7 <i>Silicona</i> .....	11
1.2.1.7.1 <i>Principales propiedades de la silicona</i> .....	11
1.2.1.7.2 <i>Unidades estructurales químicas</i> .....	11
1.2.1.7.3 <i>Tipos de siliconas</i> .....	11
1.3 <b>Destilación</b> .....	12
1.3.1 <b>Métodos de destilación</b> .....	12
1.3.2 <b>Tipos de destilación</b> .....	12
1.3.2.1 <i>Destilación binaria o simple</i> .....	12
1.3.2.1.1 <i>Ecuación general de balance de masa</i> .....	13
1.3.2.1.2 <i>Ecuación general de balance de energía</i> .....	13
1.3.2.2 <i>Destilación fraccionada</i> .....	14
1.3.2.3 <i>Destilación al vacío</i> .....	14
1.3.2.4 <i>Destilación azeotrópica</i> .....	15
1.3.2.5 <i>Destilación por arrastre de vapor de agua</i> .....	15
1.3.2.6 <i>Destilación por lotes o batch</i> .....	15
1.3.3 <b>Factores que intervienen en la destilación</b> .....	17

	<b>pp.</b>
1.3.3.1	Presión o tensión de vapor.....17
1.3.3.2	<i>Temperatura</i> .....17
1.3.3.3	<i>Volatilidad relativa</i> .....17
1.3.3.4	<i>Diagrama Temperatura – Concentración A (x, y)</i> .....17
1.4	<b>Columna de platos</b> ..... 17
1.4.1	<b>Tipos de platos</b> .....18
1.4.1.1	<i>Platos con flujo cruzado</i> .....18
1.4.1.2	<i>Platos con flujo en contracorriente</i> .....18
1.4.2	<b>Acción de un plato ideal</b> .....18
1.4.3	<b>Condición térmica de alimentación</b> .....19
1.5	<b>Recuperación del perclorotileno mediante la torre de destilación</b> ..... 19
1.5.1	<b>Objetivo</b> .....19
1.5.2	<b>Principio de operación</b> .....19
1.6	<b>Diseño</b> .....21
1.6.1	<b>Tanque de alimentación, ebullición y almacenamiento</b> .....21
1.6.1.1	<i>Densidad</i> .....21
1.6.1.2	<i>Volumen de un cono</i> .....21
1.6.1.3	<i>Volumen de un cilindro</i> .....22
1.6.2	<b>Ecuaciones para el diseño de la torre de destilación, método de MC Cabe</b> .....22
1.6.2.1	<i>Cálculo de capacidad calorífica promedio</i> .....22
1.6.2.2	<i>Cálculo de calor latente medio</i> .....22
1.6.2.3	<i>Cálculo del parámetro f de alimentación</i> .....22
1.6.2.4	<i>Cálculo de la pendiente</i> .....23
1.6.2.5	<i>Curva de equilibrio</i> .....23
1.6.2.6	<i>Recta de alimentación</i> .....23
1.6.2.7	<i>Cálculo de la relación de reflujo mínimo</i> .....23
1.6.2.8	<i>Cálculo de la relación de reflujo total</i> .....24
1.6.2.9	<i>Recta de rectificación</i> .....24
1.6.2.10	<i>Recta de agotamiento</i> .....24
1.6.2.11	<i>Platos teóricos</i> .....24
1.6.2.12	<i>Balace de masa</i> .....25
1.6.2.13	<i>Balace de masa parcial</i> .....25
1.6.2.14	<i>Cálculo de la temperatura promedio de la columna</i> .....25
1.6.2.15	<i>Cálculo de la velocidad relativa y viscosidad</i> .....26
1.6.2.15.1	<i>Cálculo de la velocidad relativa</i> .....26
1.6.2.15.2	<i>Cálculo de la fluidez</i> .....26
1.6.2.15.3	<i>Cálculo de la viscosidad</i> .....26
1.6.2.16	<i>Cálculo de los platos reales</i> .....27
1.6.2.17	<i>Cálculo del diámetro</i> .....27
1.6.2.17.1	<i>Zona de rectificación</i> .....27
1.6.2.17.1.1	<i>Cálculo de la masa molecular media</i> .....27
1.6.2.17.1.2	<i>Cálculo del caudal de vapor</i> .....27
1.6.2.17.1.3	<i>Cálculo de flujo del gas</i> .....28
1.6.2.17.1.4	<i>Cálculo del área en la zona de rectificación</i> .....28
1.6.2.17.2	<i>Zona de agotamiento</i> .....29
1.6.2.17.2.1	<i>Cálculo del caudal de vapor medio</i> .....29
1.6.2.18	<i>Cálculo del diámetro promedio</i> .....29
1.6.2.19	<i>Cálculo de la longitud</i> .....29
1.6.3	<b>Cálculo de la dinámica de los platos</b> .....30
1.6.3.1	<i>Cálculo de parámetro de flujo líquido-vapor</i> .....30

	<b>pp.</b>
1.6.3.2	<i>Determinación del factor de capacidad</i> .....30
1.6.3.3	<i>Determinación del porcentaje de inundación</i> .....30
1.6.3.4	<i>Cálculo de eficiencia</i> .....30
1.6.3.5	<i>Eficiencia húmeda de la columna por arrastre fraccional</i> .....31
1.6.3.6	<i>Diámetro de gotas formadas en el interior de la torre</i> .....31
1.6.4	<b><i>Diseño del condensador</i></b> .....31
1.6.4.1	<i>Calor latente</i> .....32
1.6.4.2	<i>Calor sensible</i> .....32
1.6.4.3	<i>Calor extraído por el condensador</i> .....32
1.6.4.4	<i>Determinación de la LMTD</i> .....32
1.6.4.5	<i>Balance de energía</i> .....33
1.6.4.6	<i>Calor aprovechado</i> .....34
1.6.4.7	<i>Calor suministrado</i> .....34
1.6.4.8	<i>Área de transferencia de calor</i> .....34
1.6.4.9	<i>Coefficiente de transferencia de calor</i> .....34
1.6.4.10	<i>Eficiencia</i> .....35
1.6.5	<b><i>Rendimiento de equipo</i></b> .....35
1.6.6	<b><i>Componentes para el equipo de destilación</i></b> .....35
1.6.6.1	<i>Materiales</i> .....35
1.6.6.2	<i>Acero inoxidable</i> .....35
1.6.6.3	<i>Bomba, tubería y accesorios</i> .....36
1.6.6.4	<i>Válvula de bola</i> .....36
1.6.6.5	<i>Lana de vidrio</i> .....36
1.6.6.6	<i>Resistencia eléctrica</i> .....36
	<b>CAPITULO II</b> .....37
2	<b>PARTE EXPERIMENTAL</b> .....37
2.1	<b>Metodología</b> .....37
2.1.1	<b>Plan de muestreo</b> .....37
2.1.2	<b>Métodos y técnicas</b> .....37
2.1.2.1	<i>Métodos</i> .....37
2.1.2.1.1	<i>Método inductivo</i> .....37
2.1.2.1.2	<i>Método deductivo</i> .....38
2.1.2.1.3	<i>Método descriptivo</i> .....38
2.1.2.2	<i>Técnicas</i> .....39
2.1.2.2.1	<i>Análisis de laboratorio</i> .....39
2.1.2.2.2	<i>Determinación del destilado de la mezcla PERC - silicona</i> .....40
2.1.2.2.3	<i>Requisitos para el destilado</i> .....41
2.1.2.2.4	<i>Determinación del pH</i> .....42
2.1.2.2.5	<i>Determinación de la densidad con picnómetro</i> .....43
2.1.2.2.6	<i>Determinación de la densidad con probeta</i> .....44
2.1.2.2.7	<i>Temperatura de ebullición del destilado</i> .....45
2.1.2.2.8	<i>Determinación del color en escala APHA</i> .....46
2.1.2.2.9	<i>Olor del destilado</i> .....47
2.1.2.2.10	<i>Determinación del espectro IR del destilado</i> .....48
2.1.2.2.11	<i>Determinación del enlace múltiple</i> .....49
2.1.2.2.12	<i>Determinación de la viscosidad de la silicona</i> .....50
2.2	<b>Datos de diseño</b> .....51
2.2.1	<b>Diagnostico</b> .....51
2.2.2	<b>Datos experimentales</b> .....51
2.2.3	<b>Datos adicionales</b> .....54



	<b>pp.</b>
<b>CAPITULO III</b> .....	55
3 <b>CÁLCULOS Y RESULTADOS</b> .....	55
3.1 <b>Cálculos</b> .....	55
3.1.1 <b>Cálculo del tanque de ebullición</b> .....	55
3.1.1.1 <i>Volumen de alimentación</i> .....	55
3.1.1.2 <i>Volumen total del tanque de ebullición</i> .....	55
3.1.1.3 <i>Volumen del cono inferior</i> .....	55
3.1.1.4 <i>Volumen del cilindro</i> .....	56
3.1.1.5 <i>Volumen de las resistencias</i> .....	56
3.1.1.6 <i>Volumen del cilindro con las resistencias en su interior</i> .....	56
3.1.1.7 <i>Volumen del cono inferior y cilindro con las resistencias en su interior</i> .....	56
3.1.1.8 <i>Volumen del cono superior</i> .....	57
3.1.1.9 <i>Altura del cono superior</i> .....	57
3.1.1.10 <i>Altura total del tanque de ebullición</i> .....	57
3.1.1.11 <i>Altura de alimentación en el tanque de ebullición</i> .....	57
3.1.2 <b>Cálculo para el tanque de alimentación</b> .....	58
3.1.2.1 <i>Volumen total del tanque de alimentación</i> .....	58
3.1.2.2 <i>Volumen del cono inferior y superior</i> .....	58
3.1.2.3 <i>Volumen del cilindro</i> .....	58
3.1.2.4 <i>Altura del cilindro</i> .....	59
3.1.2.5 <i>Altura total del tanque de alimentación</i> .....	59
3.1.2.6 <i>Altura de llenado en el tanque de alimentación</i> .....	59
3.1.3 <b>Cálculo para la columna de destilación</b> .....	59
3.1.3.1 <i>Cálculo de la capacidad calorífica promedio</i> .....	60
3.1.3.2 <i>Cálculo del calor latente medio</i> .....	60
3.1.3.3 <i>Cálculo del parámetro <math>f</math> de alimentación</i> .....	60
3.1.3.4 <i>Cálculo de la pendiente</i> .....	60
3.1.3.5 <i>Grafica del sistema</i> .....	60
3.1.3.5.1 <i>Línea de 45°</i> .....	60
3.1.3.5.2 <i>Curva de equilibrio vapor-liquido</i> .....	61
3.1.3.5.3 <i>Líneas de referencia en fracción de <math>x_F</math>, <math>x_D</math> y <math>x_W</math></i> .....	61
3.1.3.5.4 <i>Recta de alimentación</i> .....	61
3.1.3.6 <i>Cálculo de la relación de reflujo mínimo</i> .....	61
3.1.3.7 <i>Cálculo de la relación de reflujo total</i> .....	62
3.1.3.8 <i>Recta de agotamiento</i> .....	62
3.1.3.9 <i>Trazado del número de platos teóricos</i> .....	62
3.1.3.10 <i>Cálculo del flujo molar de alimentación</i> .....	62
3.1.3.11 <i>Balance de masa</i> .....	63
3.1.3.12 <i>Balance de masa parcial</i> .....	63
3.1.3.13 <i>Cálculo de la temperatura promedio de la columna</i> .....	64
3.1.3.14 <i>Cálculo de la volatilidad relativa y viscosidad</i> .....	64
3.1.3.14.1 <i>Cálculo de la volatilidad relativa</i> .....	64
3.1.3.14.2 <i>Cálculo de la fluidez</i> .....	65
3.1.3.14.3 <i>Calculo de la viscosidad</i> .....	65
3.1.3.15 <i>Cálculo de los platos reales</i> .....	65
3.1.3.16 <i>Cálculo del plato de alimentación</i> .....	66
3.1.3.17 <i>Cálculo del diámetro</i> .....	66
3.1.3.17.1 <i>Zona de rectificación</i> .....	66
3.1.3.17.1.1 <i>Cálculo de la masa molecular media</i> .....	66
3.1.3.17.1.2 <i>Cálculo del caudal de vapor</i> .....	66

	<b>pp.</b>
3.1.3.17.1.3	<i>Cálculo de la densidad de vapor</i> .....66
3.1.3.17.1.4	<i>Cálculo de flujo del gas</i> .....67
3.1.3.17.1.5	<i>Cálculo del área en la zona de rectificación</i> .....67
3.1.3.17.1.6	<i>Cálculo del diámetro de la columna en la zona de rectificación</i> .....67
3.1.3.17.2	<i>Zona de agotamiento</i> .....67
3.1.3.17.2.1	<i>Cálculo de la masa molecular media</i> .....67
3.1.3.17.2.2	<i>Cálculo del caudal de vapor medio</i> .....68
3.1.3.17.2.3	<i>Cálculo de la densidad de vapor</i> .....68
3.1.3.17.2.4	<i>Cálculo de flujo del gas</i> .....68
3.1.3.17.2.5	<i>Cálculo del área en la zona de agotamiento</i> .....68
3.1.3.17.2.6	<i>Cálculo del diámetro de la columna en la zona de agotamiento</i> .....68
3.1.3.18	<i>Cálculo del diámetro promedio</i> .....69
3.1.3.19	<i>Cálculo de la longitud</i> .....69
3.1.3.20	<i>Longitud de la columna y diámetro de platos</i> .....69
3.1.4	<b><i>Cálculo de la dinámica de los platos</i></b> .....69
3.1.4.1	<i>Cálculo de parámetro de flujo liquido-vapor</i> .....69
3.1.4.2	<i>Determinación del factor de capacidad</i> .....70
3.1.4.3	<i>Determinación del porcentaje de inundación</i> .....70
3.1.4.4	<i>Cálculo de eficiencia</i> .....70
3.1.4.5	<i>Cálculo de eficiencia húmeda de la columna; por el arrastre fraccional</i> .....70
3.1.4.6	<i>Cálculo del diámetro de las gotas formadas en el interior de la torre</i> .....71
3.1.5	<b><i>Cálculos del condensador</i></b> .....71
3.1.5.1	<i>Cálculo del calor a quitar del vapor de PERC para que condense</i> .....71
3.1.5.1.1	<i>Calor latente</i> .....71
3.1.5.1.2	<i>Calor sensible</i> .....72
3.1.5.1.3	<i>Calor total correspondiente al calor extraído por el condensador</i> .....72
3.1.5.2	<i>Cálculo del caudal másico de agua requerida</i> .....72
3.1.5.3	<i>Volumen de agua ocupado en el condensador</i> .....72
3.1.5.4	<i>Volumen ocupado por el serpentín</i> .....73
3.1.5.5	<i>Volumen de la cámara de condensación</i> .....73
3.1.5.6	<i>Altura del cilindro</i> .....73
3.1.5.7	<i>Determinación de la LMTD</i> .....73
3.1.5.7.1	<i>Cálculo de la temperatura <math>T_x</math></i> .....74
3.1.5.7.2	<i>Cálculo de la LMTD para la condensación</i> .....74
3.1.5.7.3	<i>Cálculo de LMTD para el enfriamiento</i> .....75
3.1.6	<b><i>Cálculo del tanque de almacenamiento</i></b> .....75
3.1.6.1	<i>Volumen total del tanque de almacenamiento</i> .....75
3.1.6.2	<i>Volumen del cono inferior y superior</i> .....75
3.1.6.3	<i>Volumen del cilindro</i> .....75
3.1.6.4	<i>Altura del cilindro del tanque de almacenamiento</i> .....76
3.1.6.5	<i>Altura total del tanque de almacenamiento</i> .....76
3.1.6.6	<i>Altura de llenado en el tanque de almacenamiento</i> .....76
3.1.7	<b><i>Balance de energía</i></b> .....76
3.1.7.1	<i>Calor del condensador</i> .....77
3.1.7.2	<i>Cálculo del calor requerido para calentar la mezcla PERC-SILICONA</i> .....77
3.1.7.3	<i>Cálculo del calor suministrado por las resistencias</i> .....77
3.1.7.4	<i>Calor aprovechado por la mezcla, suministrada por las resistencias</i> .....77
3.1.7.5	<i>Calor perdido en el tanque de ebullición suministrado por las resistencias</i> .....77
3.1.7.6	<i>Eficiencia en el tanque ebullición referente al calor aprovechado</i> .....78
3.1.7.7	<i>Eficiencia en el tanque de ebullición referente al calor requerido</i> .....78

	<b>pp.</b>
3.1.7.8	<i>Cálculo del área de transferencia de calor</i> .....78
3.1.7.9	<i>Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor</i> .....78
3.1.7.10	<i>Calculo de la entalpia de alimentación de la mezcla <math>H_F</math></i> .....78
3.1.7.11	<i>Calculo de la entalpia de residuo <math>H_W</math></i> .....79
3.1.7.12	<i>Calculo del calor perdido</i> .....79
3.1.8	<b><i>Eficiencia del equipo</i></b> .....79
3.1.9	<b><i>Cálculo de masa del residuo generado, destilado y residuo de fondo</i></b> .....79
3.1.9.1	<i>Cálculo de masa del volumen de residuo generado</i> .....79
3.1.9.2	<i>Cálculo de masa del volumen de destilado</i> .....80
3.1.9.3	<i>Cálculo de masa del volumen de residuo de fondo</i> .....80
3.1.10	<b><i>Rendimiento del equipo</i></b> .....80
3.2	<b>Resultados</b> .....80
3.2.1	<b><i>Partes de la torre de destilación</i></b> .....80
3.2.2	<b><i>Parámetro de diseño</i></b> .....82
3.2.3	<b><i>Dimensiones de la torre de destilación</i></b> .....82
3.2.4	<b><i>Condiciones de operación de la torre</i></b> .....83
3.3	<b>Análisis y discusión de resultados</b> .....84
3.4	<b>Propuesta</b> .....86
3.4.1	<b><i>Costo de inversión del proyecto</i></b> .....86
3.4.1.1	<i>Costo de materiales empleados y transporte</i> .....86
3.4.1.2	<i>Costo por recursos humanos</i> .....86
3.4.1.3	<i>Costo total del estudio realizado</i> .....86
3.4.2	<b><i>Costo de inversión para la construcción del equipo</i></b> .....87
3.4.3	<b><i>Análisis de costos de residuos, operacional del equipo y beneficio</i></b> .....87
3.4.3.1	<i>Costo del residuo generado</i> .....87
3.4.3.2	<i>Costo del residuo de fondo obtenido de la torre</i> .....88
3.4.3.3	<i>Valor económico del destilado</i> .....88
3.4.3.4	<i>Costo de operación de la torre por el operario</i> .....88
3.4.3.5	<i>Costo de consumo de energía eléctrica de la torre</i> .....88
3.4.3.6	<i>Beneficio económico para la industria</i> .....89
<b>CONCLUSIONES</b> .....90	
<b>RECOMENDACIONES</b> .....91	
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	
<b>GLOSARIO</b>	
<b>ANEXOS</b>	

## INDICE DE ANEXOS

Anexo A	Ficha de datos de seguridad-propiedades y silicona.
Anexo B	Destilación y resistencia eléctrica.
Anexo C	Inducalsa.
Anexo D	Destilación simple y muestras.
Anexo E	pH y viscosidad.
Anexo F	Informe de calibración e instructivo de viscosidad.
Anexo G	Color de muestras.
Anexo H	Comparación de IR.
Anexo I	Documentos del IR.
Anexo J	Graficas de diseño.
Anexo K	Diseño del tanque de ebullición.
Anexo L	Diseño del tanque de alimentación.
Anexo M	Diseño de la columna.
Anexo N	Diseño del condensador y distribuidor de corriente.
Anexo O	Diseño del tanque de almacenamiento.
Anexo P	Diseño de la torre de destilación.
Anexo Q	Diseño del equipo.

## INDICE DE CUADROS

	<b>pp.</b>
<b>Cuadro 1-2:</b> Determinación de cantidad de destilado por destilación simple.....	40
<b>Cuadro 2-2:</b> Requisitos para el destilado percloroetileno.....	41
<b>Cuadro 3-2:</b> Potencial hidrogeno del destilado (percloroetileno).....	42
<b>Cuadro 4-2:</b> Densidad del destilado (percloroetileno).....	43
<b>Cuadro 5-2:</b> Densidad del destilado (percloroetileno).....	44
<b>Cuadro 6-2:</b> Temperatura de ebullición a presión atmosférica del destilado.....	45
<b>Cuadro 7-2:</b> Color del destilado.....	46
<b>Cuadro 8-2:</b> Olor del destilado.....	47
<b>Cuadro 9-2:</b> Espectrometría al destilado.....	48
<b>Cuadro 10-2:</b> Determinación del enlace múltiple en los carbonos adyacentes.....	49
<b>Cuadro 11-2:</b> Determinación de viscosidad en la silicona.....	50

## INDICE DE GRAFICOS

	<b>pp.</b>
<b>Grafico 1-1:</b> Diagrama de flujo de inducalsa.....	6
<b>Grafico 2-1:</b> Diagrama de flujo fabricación de suelas.....	7
<b>Grafico 3-3:</b> Curva de equilibrio y fracciones.....	61
<b>Grafico 4-3:</b> Determinación de platos.....	62
<b>Grafico 5-3:</b> Balance de masa.....	63
<b>Grafico 6-3:</b> Variación de la temperatura del condensador.....	73
<b>Grafico 7-3:</b> Diseño del equipo.....	81

## INDICE DE TABLAS

	<b>pp.</b>
<b>Tabla 1-1:</b> Propiedades generales del percloroetileno.....	10
<b>Tabla 2-1:</b> Propiedades físico-químicas del percloroetileno.....	10
<b>Tabla 3-1:</b> Condición de alimentación térmica.....	19
<b>Tabla 4-1:</b> Características de resistencia rosca-centrada.....	36
<b>Tabla 5-2:</b> Caudal de alimentación.....	51
<b>Tabla 6-2:</b> Datos de destilación.....	52
<b>Tabla 7-2:</b> Datos de pH.....	52
<b>Tabla 8-2:</b> Datos de densidad.....	53
<b>Tabla 9-2:</b> Datos de equilibrio líquido-vapor.....	53
<b>Tabla 10-2:</b> Componentes y flujo de alimentación.....	53
<b>Tabla 11-2:</b> Tiempos de residencia.....	53
<b>Tabla 12-2:</b> Datos de densidad y pH.....	54
<b>Tabla 13-2:</b> Datos sobre componentes de la mezcla.....	54
<b>Tabla 14-3:</b> Temperaturas de la mezcla.....	64
<b>Tabla 15-3:</b> Temperatura y fracciones.....	64
<b>Tabla 16-3:</b> Partes de la torre.....	82
<b>Tabla 17-3:</b> Parámetro de diseño.....	82
<b>Tabla 18-3:</b> Dimensiones y material de la torre.....	82
<b>Tabla 19-3:</b> Condiciones de operación de la torre.....	84
<b>Tabla 20-3:</b> Costo de materiales y transporte.....	86
<b>Tabla 21-3:</b> Costos de recursos humanos.....	86
<b>Tabla 22-3:</b> Costo total del estudio realizado.....	87
<b>Tabla 23-3:</b> Costo del equipo.....	87

## RESUMEN

El diseño de la torre de destilación con rectificación se realizó con el objetivo de recuperar el PERC en Inducalsa, por el lavado de suelas en la fabricación de zapatos, para disminuir la cantidad de residuo y costos al reutilizar el solvente.

Inducalsa genera cada dos meses un promedio de 450 Kg de residuo percloroetileno-silicona, por producir un promedio de 30000 pares de suelas mensual en el área de PU, se debe pagar por la disposición final 0,90 ctvs., por cada kilogramo de residuo. Se recolecto 20 muestras de forma aleatorio simple en cuatro semanas, para determinar en el laboratorio el pH, la densidad, viscosidad, presiones parciales, fracciones de curva de equilibrio y comparando la pureza del solvente recuperado con la ficha de seguridad DIRSA mediante el espectro IR con lo cual, el destilado tiene las mismas características del PERC puro, entonces los parámetros determinados fueron la temperatura, tiempo y flujos de corrientes con sus correspondientes rangos para un óptimo funcionamiento, el equipo diseñado cuenta con un tanque de ebullición con cuatro resistencias, la salida de vapor se alimenta a la columna de platos, en la parte inferior de la columna hay un tanque de alimentación de donde se bombea hacia el tanque de ebullición, un condensador de serpentín; un distribuidor de corriente para el reflujo, así como un recipiente para almacenar el solvente; el equipo procesa 45,73 Kg/h.

Como resultado se obtuvo una torre de destilación con un rendimiento del 48 %, aceptable por el valor económico del solvente en el mercado y una eficiencia del 85,33 %, son resultados positivos que indican el poder procesar el residuo para obtener el solvente al 100% de pureza, el equipo es muy útil para disminuir la contaminación, permite un ahorro al pagar la disposición final del residuo de fondo, ganancia por adquirir menos cantidad de solvente en el mercado, contribuyendo así en el cambio de la matriz productiva.

<TORRE DE DESTILACIÓN> <LAVADO DE SUELAS> <PERC-SILICONA> <DISPOSICIÓN FINAL> <ANÁLISIS DE DENSIDAD Y VISCOSIDAD> <DETERMINACIÓN DE pH> <DIRSA-PERC> <COLUMNA DE PLATOS> <RECTIFICACIÓN EN LA TORRE> <RENDIMIENTO DEL EQUIPO> <EFICIENCIA DEL EQUIPO>



## SUMMARY

The distillation with rectification Tower design was carried out in order to recover the PERC in Inducalsa, by washing of soles in shoes manufacturing, to reduce the amount of waste and costs by reusing the solvent.

Inducalsa generates every two months an average of 450 Kg of residual perchloroethylene-silicone, by producing an average of 30000 pairs of soles monthly in the area of PU, it should be paid by the final disposition 0,90 cents., for each kilogram of waste. We collect 20 samples for simple random in four weeks, to determine in the laboratory pH, density, viscosity, partial pressures, fractions of equilibrium curve and comparing the purity of recovered solvent with the material safety data sheet DIRSA using the spectrum go with which the distillate has the same characteristics of the pure PERC, then certain parameters were temperature, time and flows with their corresponding ranges for optimum performance, the designed equipment has a tank of boiling with four resistors, steam is fed to the column, at the bottom of the column there is a feed tank where is pumped into the tank of boiling, a condenser coil; a distributor of power for reflux, as well as a container to store the solvent; the team processed 45,73 Kg/h.

As a result, it was obtained a distillation tower with a yield of 48%, acceptable by the economic value of the solvent on the market and an efficiency of 75%, are positive results which indicate process residue solvent for 100% purity, equipment is very useful to reduce pollution, it allows savings to pay the final disposal of the residue of Fund gain by purchasing less amount of solvent in the market, thus contributing in the change of the productive matrix.

< DISTILLATION TOWER > < WASH SOLES > < PERC - SILICON > < DISPOSAL > < ANALYSIS DENSITY AND VISCOSITY > < DETERMINATION OF PH > < DIRSA - PERC > < COLUMN OF DISHES > < CORRECTION IN THE TOWER > < PERFORMANCE EQUIPMENT > < EFFICIENCY TEAM >

## INTRODUCCION

En la Industria del petróleo y química se emplea la operación de destilación para la separación de componentes de corrientes líquidas, para obtener productos con características deseadas en el mercado, un ejemplo de esto es la industria licorera.

Este proyecto de tesis tiene como finalidad diseñar un equipo de destilación para la recuperación de un solvente de alta calidad a partir del residuo generado en el lavado de suelas de zapatos en una canastilla, en el cual se contamina el percloroetileno con la silicona, el residuo generado en la Industria Nacional de Calzado S.A puede reutilizarse, al ser tratados como un subproducto con un valor económico y evitar la eliminación eventual, contribuyendo a disminuir los daños al ambiente y beneficiar a la industria por reutilizar el PERC recuperado, por ende adquirir menos cantidad del solvente.

El interés que presenta el Ingeniero Químico en esta Operación Unitaria en el cambio de la matriz productiva e innovación para la obtención de productos terminados, es el tipo de material, el tiempo de operación, el consumo energético, para esta investigación la industria inducalsa ha visto la necesidad de la implementación en su área de producción PU, un equipo que tenga por finalidad la separación de la mezcla percloroetileno-silicona, analizando los parámetros solicitados por los técnicos del área de lavado de suelas, se llegó al consenso para diseñar un equipo de destilación binaria que brindará resultados de eficiencia, verificando el volumen de residuo generado se procede a la recolección de muestras para ser analizadas en la misma industria y posteriormente en laboratorios acreditados, obteniéndose resultados favorables, se procede a la recolección bibliográfica de información concerniente al tema tanto de la industria, solventes, destilación y diseños de ingeniería, los estudios de laboratorio efectuados de destilaciones simples con el residuo percloroetileno –silicona, se obtuvo el 48% de solvente recuperado, éstos fueron analizados en laboratorios donde se les practicaron las pruebas respectivas para ver si cumplen con las exigencias pedidas por inducalsa, las muestras cumplieron con los valores estipulados en la hoja de seguridad DIRSA – PERC y también por laboratorio acreditado.

Con lo antes expuesto, se llevó acabo la presente investigación cuyo objetivo principal es realizar el diseño para la recuperación de percloroetileno mediante el método de la destilación, proveniente del lavado de suelas en la Industria INDUCALSA, en el área de PU se fabrican un promedio mensual de 30000 suela de diferentes tallas y modelos, sus marcas representativas son:

- LOTUS
- LOYUS INDUSTRIAL
- PAOLA

- BUNKI SPORT
- ROGERS
- CRICKETS

El presente estudio determinó los parámetros necesarios para el diseño del equipo de destilación que servirá para la recuperación del percloroetileno proveniente del lavado de para su posterior reutilización, disminuyendo la contaminación al ambiente e impulsando un menor costo de producción, por ende la mejora económica para la industria, el equipo mencionado estará compuesto por la alimentación, con un tanque de ebullición para 86,27 L, de 0,57 m de alto y 0,60m de diámetro, en su interior cuatro resistencias de inmersión cubiertas por acero negro, una columna con 12 platos de diámetro 0,26 m separados entre sí por 0,10 m y de altura total 1,45 m; un condensador cilíndrico de 0,44m de alto de diámetro 0,22 m; un distribuidor de corriente y un tanque de almacenamiento con diámetro 0,60 y 0,71 m de altura con capacidad de almacenar 164,64 L, estas son las dimensiones específicas para el equipo que requiere la industria inducalsa.

### **Antecedentes**

Desde la antigüedad el hombre por curiosidad y necesidad permitió el avance tecnológico hasta nuestros días en busca de mejores condiciones de vida, es así que el separar componentes de una mezcla se debe a varias técnicas de uso en la química convencional en el descubrimiento que realizaron los alquimistas en el primer siglo de nuestra era con el alambique para destilar y desde entonces con la evolución surgen nuevas técnicas para un mismo principio.

La destilación es una operación unitaria que separa componentes de una mezcla debido al equilibrio líquido-vapor que se produce al someter la mezcla a temperaturas de las cuales el componente más volátil se evapora, en la fase gaseosa se genera una alta concentración de componentes ligeros mientras que en la fase líquida esta una alta concentración de componentes pesados y así obtener de la mezcla uno de los componentes a un determinado grado de pureza.

En los años 1930 y 1960, se realizaron muchos estudios para predecir la eficiencia de las columnas de destilación, pero a partir de que el Instituto Americano de Ingenieros Químicos formó una comisión para estudiar dicho problema, cuando se obtuvo un método confiable para determinar la eficiencia en columnas de destilación binaria y que el problema fue resuelto, entonces se orientaron hacia el diseño de columnas que trabajaran con mezclas de multicomponentes.

El fabricar objetos de vidrio facilita la enseñanza de la destilación con materiales como balones, matraces, refrigerantes, probetas termómetros muy empleados hoy para prácticas de laboratorio

enseñanza - aprendizaje y que es una de las técnicas de separación de componentes más empleadas en la investigación química.

La Operación Unitaria de destilación tiene muchas fuentes de información en el internet, en libros, investigaciones y estudios, la destilación es una opción para la separación de componentes que es útil para las empresas e industrias, se encuentra presente en los procesos químicos, petroquímicos, pero se ha ido reemplazando por otras operaciones debido a razones como mayor rendimiento, menor consumo de energía en los que se puede mencionar la adsorción, extracción líquido-líquido.

Existen muchos equipos diseñados y construidos para la destilación de varios tipos de sustancias, pero en Inducalsa no se ha encontrado información referente a la purificación del percloroetileno proveniente de la actividad de lavado de suelas, se tomará entonces como pauta la operación unitaria de destilación para realizar la separación del solvente a recuperar.

“La Industria Nacional de Calzado S.A, se encuentra ubicada en Quimiag Oe2-16 y Gonzol (Panamericana Sur Km 7) en Quito – Provincia de Pichincha, el sector donde se halla ubicada la empresa también se encuentra otras industrias a sus alrededores así como ensambladoras de autos, línea blanca de cocinas y neveras de uso doméstico, negocio comercial, existen lejanamente restaurantes y la población que habita cercanamente en su mayoría está adaptada al trajín diario del sector.

En el año de 1864, Gustav Krebs, alemán, instalo una fábrica de calzado en Nápoles, Italia, nunca imagino que a miles de kilómetros, al otro lado del mar, en otro continente, su bisnieto Guido Krebs iba a seguir sus pasos, la empresa se radico en Quito, Ecuador en 1973 pero se constituyó el 1 de Agosto en el año de 1974 como INDUCALSA Industria Nacional de Calzado S.A.

El 16 de Septiembre de 1975 salió al mercado los primeros zapatos BUNKI, como inicio de aquel sueño que ya era realidad, el calzado BUNKI escolar fue un éxito en todo el país.

INDUCALSA creo otras dos industrias para producir calzado casual:

- FABRICAL CIA.LTDA, fundada en 1986
- CALZATODO.CIA.LTDA, fundada en 1997

A finales del año 1999 INDUCALSA ya exporto sus productos.

Esta empresa se dedica a la fabricación de calzado y para la limpieza de suelas utilizan el percloroetileno como parte del proceso de fabricación, comercializa sus productos bajo su marca identificada como BUNKI, no existe registro de estudios realizados anteriormente para la recuperación del percloroetileno a partir del residuo obtenido en la limpieza de suelas del calzado en dicha industria, lo que hace necesario que se realice el estudio de este residuo obtenido después del lavado de suelas para buscar una posible solución que disminuya la contaminación del ambiente y costos de la empresa.

En Ecuador en la provincia de Pichincha desde que la industria se radico en Quito, en 1973, pero se constituyó el 1 de Agosto en el año de 1974 como INDUCALSA Industria Nacional de Calzado S.A, y que el 16 de Septiembre de 1975 salió al mercado los primeros zapatos BUNKI, como inicio de aquel sueño que ya era realidad, el calzado BUNKI escolar fue un éxito en todo el país, éstos utilizan cantidades considerables de percloroetileno que una vez usado es desechado, con un proceso de destilación sencilla es posible reutilizar éste disolvente y no desecharlo para mejorar el estado económico de la industria y disminuir la sustancias contaminantes al ambiente.”

A nivel provincial en Pichincha y en el Ecuador no hay referencia de equipo recuperador del percloroetileno que estén implementados específicamente torre de destilación, pero a nivel internacional existe el Hy125Ex Hong Yi equipo de recuperación de percloroetileno, hecho en China el cual tiene un costo de adquisición de quince mil dólares aproximadamente, este equipo es un destilador simple que se calienta con un aceite diatérmico para producir la evaporación y un condensador, pero implementar este equipo requiere apegarse a las políticas de mantenimiento y reparaciones técnicas por los fabricantes.

### **Justificación**

La industria se debe mantener regularizada ante el ministerio del ambiente mediante el Acuerdo Ministerial N° 026 que expídanse los procedimientos para registrarse como generadora de desechos peligrosos, gestión de desechos peligrosos previo al licenciamiento ambiental, y para el transporte de materiales peligrosos, para tener un gestor ambiental que pueda dar tratamiento final al residuo generado, por tal motivo el estudio del residuo revela que el principal contaminante del residuo es la silicona con el percloroetileno y que este tiene propiedades como la de la volatilidad a menor temperatura que la de la silicona se opta por realizar una operación como la destilación.

El percloroetileno es un solvente que al ser utilizado en el proceso de limpieza en la fabricación de suelas en la industria de calzado va perdiendo su efectividad al ser saturada con silicona por lo cual después de cierto tiempo de uso es desechado para ser incinerado, el cual tiene un coste de 0,90 centavos de dólar americano cada kilogramo de este residuo generado, con la necesidad de obtener un líquido destilado que tenga las mismas propiedades que el PERC puro se desarrolla el diseño de una torre de destilación con rectificación y cumplir las exigencias propuestas por la industria como rendimiento, pureza y eficiencia.

La torre de destilación con rectificación presenta la característica de poder recuperar el percloroetileno aprovechando la diferencia de temperatura en los diferentes puntos de ebullición que tienen las sustancias de la mezcla percloroetileno – silicona, el diseño del equipo de destilación permite obtener un líquido destilado con una pureza del 100% que es el solvente recuperado y de esta manera disminuir la cantidad de residuo generado y por ende menor contaminación al ambiente, así como menores costos de producción.

Por otra parte los procesos industriales siempre están en competencia y por lo tanto el optimizar el procesos es necesario, considerando lo expuesto, la destilación es un proceso sencillo y de fácil aplicación, de un costo económico bajo que no afecta realmente la viabilidad de una industria y que mejora su responsabilidad en producir menores residuos contaminantes, por lo antes mencionado se justifica el dimensionamiento del equipo para cubrir la necesidad en esta área de producción PU en la utilización de percloroetileno para lavar las suelas.

## **Objetivo**

### **General**

Realizar el diseño para la recuperación de percloroetileno mediante el método de la destilación.

### **Específicos**

- Realizar el estudio experimental de recuperación de percloroetileno por medio de la destilación.
- Determinar la pureza del percloroetileno recuperado a partir del residuo, comparándolo con la ficha de datos de seguridad DIRSA – PERCLOROETILENO.
- Identificar las variables del proceso.
- Efectuar los cálculos de ingeniería para la torre de destilación en platos de acuerdo a los requerimientos de Inducalsa
- Realizar el estudio de costo-beneficio.

# CAPITULO I

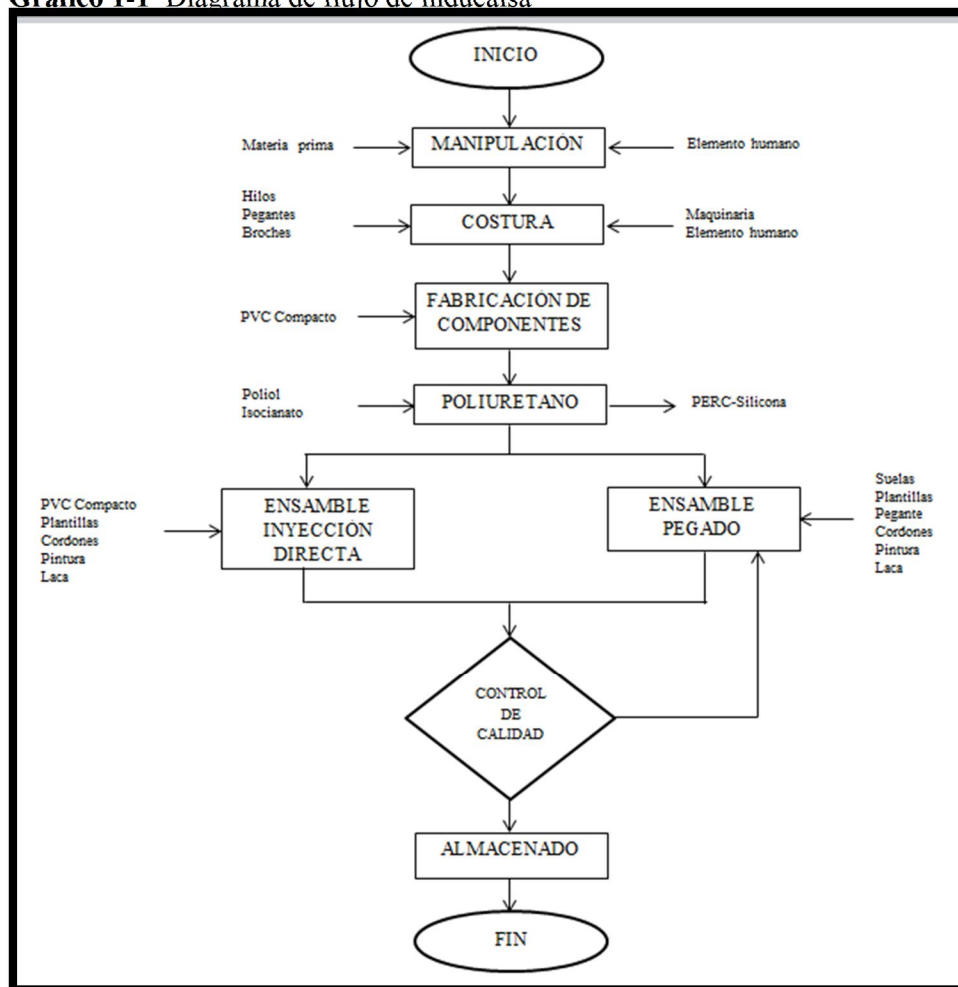
## 1 MARCO TEÓRICO

La destilación es una Operación Unitaria en la que están inmersas diversas variables que afectan al proceso como tal, por lo que es necesario conocer la materia prima con la que se va a trabajar en el mismo las cuales a continuación son detalladas.

### 1.1 Inducalsa

#### 1.1.1 Diagrama de flujo del proceso de fabricación de zapatos en inducalsa

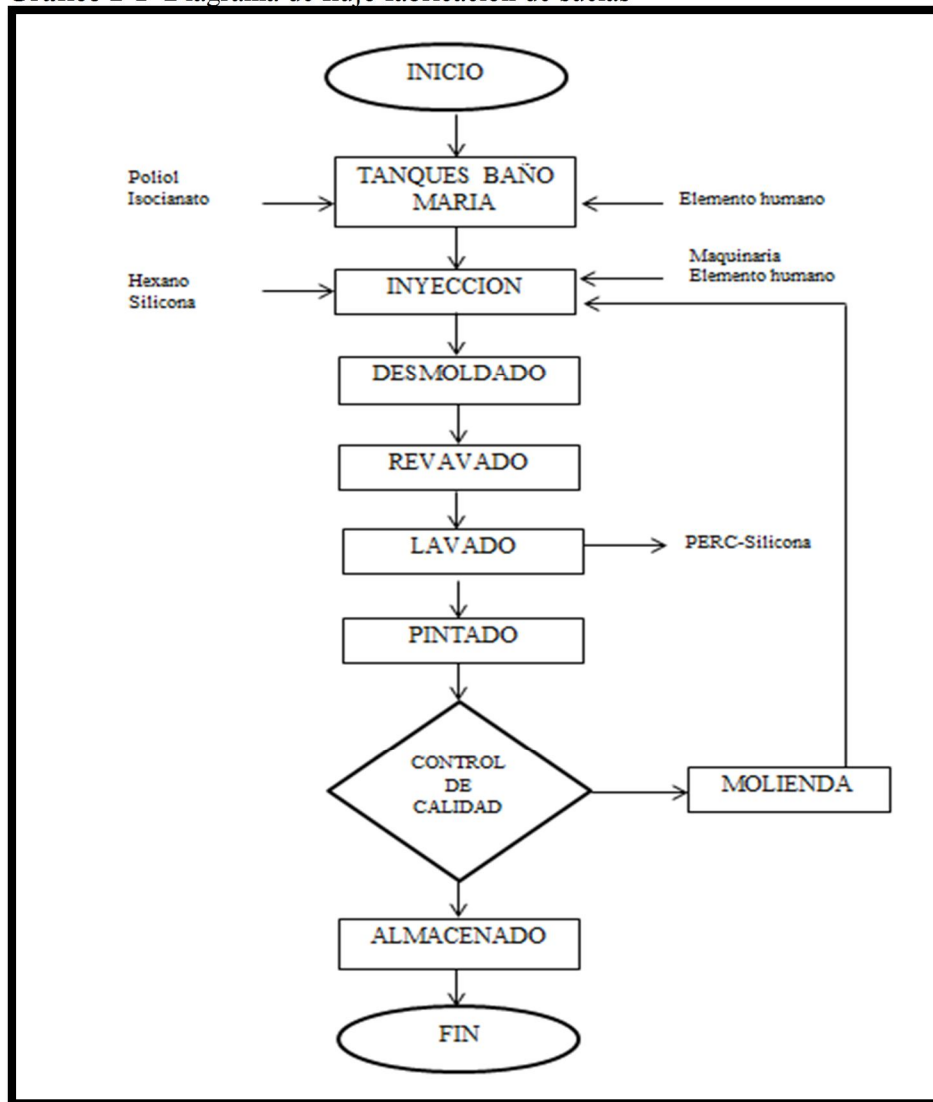
**Grafico 1-1** Diagrama de flujo de inducalsa



Realizado por: ANDRADE W., Laboratorio Control de Calidad inducalsa, 2014  
Fuente: SINCHÉ. O., Área PU inducalsa, 2015

### 1.1.2 Diagrama de flujo del proceso de fabricación de suelas PU

Grafico 2-1 Diagrama de flujo fabricación de suelas



Realizado por: ANDRADE W., Laboratorio Control de Calidad inducalsa, 2014  
Fuente: SINCHE. O., Área PU inducalsa, 2015

### 1.1.3 Suelas de poliuretano

Son suelas de una mezcla de materiales como el Poliol y el Isocianato con un reactivo, esta mezcla es empleada por:

- Un bajo peso.
- Alta durabilidad.
- Facilidad de producción del material.
- Mantener costos bajos.
- Mayor empleo en suelas para damas.



### **1.1.4 Lavado de suelas PU**

Las suelas se colocan en un equipo de canastilla donde esta máquina utiliza percloroetileno que remueve de la superficie adherida, debido a que esta fue aplicada en el molde para el proceso de inyección y para facilitar el desmoldado de las suelas, es así que se genera una mezcla PERS-Silicona en el equipo y a medida que se lava más suelas el solvente se satura y tiene que ser retirado.

## **1.2 Solventes**

Sustancia que actúa como medio dispersante de un soluto, es una sustancia líquida que disocia a otra sustancia en su forma más elemental y que se presenta en mayor cantidad que el soluto. (Solventes: <http://definicion.de/solvente/>)

### **1.2.1 Tipos de solventes**

#### **1.2.1.1 Agua**

Es el disolvente universal de elevado momento dipolar y facilidad para formar puentes de hidrógeno, no es tóxico ni inflamable, tiene baja solubilidad con las resinas, una molécula o ión es soluble en agua si interactúa con moléculas de la misma clase mediante puentes de hidrógeno o interacción del tipo ion-dipolo.

#### **1.2.1.2 Solventes orgánicos**

Son los más utilizados porque se los emplea solos o combinados con otras sustancias sin cambio químico, pero liberan compuestos orgánicos volátiles peligrosos para el ambiente, sirven para:

- Disolver materias primas.
- Material residual.
- Limpiar suciedades.
- Modificar la viscosidad.

Por lo cual se debe tener:

- Diseño de proceso que reduzca al máximo los subproductos, al obtener productos terminados.
- Diseño de procesos energéticamente eficientes.
- Usar sustancias amigables con el ambiente. (Solventes orgánicos: <http://es.slideshare.net/abarahona/solventes-organicos>)

#### **1.2.1.3 Solventes polares**

Son moléculas con un dipolo permanente, polo positivo y negativo con distribución electrónica asimétrica, ejemplo el agua y alcoholes con bajo peso molecular, entre los solventes tenemos:

- a. Disolventes polares próticos:
  - Contienen un enlace (O-H) o (N-H).

- Agua (H-O-H), etanol (CH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>-OH) y ácido acético (CH<sub>3</sub>-C(=O)OH).
- b. Disolventes polares apróticos:
  - No tiene enlaces (O-H) o (N-H).
  - La acetona (CH<sub>3</sub>-C(=O)-CH<sub>3</sub>) y THF o Tetrahidrofuranol. ( Solventes polares: <http://solidosysolventes.blogspot.com/2009/04/propiedades-generales.html>)

#### 1.2.1.4 Solventes apolares

Son sustancias orgánicas con distribución electrónica simétrica, sin dipolos permanentes, pero no implica que algunos de sus enlaces sean polares, depende de la geometría de las moléculas, si los momentos dipolares individuales de los enlaces están compensados, la molécula será en conjunto apolar como son:

- Dietiléter
- Cloroformo
- Benceno
- Tolueno
- Xileno
- Cetonas
- Hexano
- Ciclohexano
- Tetracloruro de carbono

Un caso especial son los líquidos fluorosos, se comportan como disolventes más apolares que los disolventes orgánicos convencionales. (Solventes apolares: <http://solidosysolventes.blogspot.com/2009/04/propiedades-generales.html>)

#### 1.2.1.5 Solventes alternativos

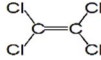
- Solventes reactivos: Baja volatilidad relativa y con capacidad de reaccionar con otros componentes, evaporándose en el ambiente, no tienen compuestos orgánicos volátiles.
- Solventes benignos: Respetuosos con el ambiente, libres de compuestos clorados, baja toxicidad y baja reactividad.
- Solventes neotéricos: El término neo significa moderno, es una serie de solventes con una menor toxicidad, más seguros y menos contaminantes que los solventes convencionales, se incluyen nuevos fluidos con propiedades ajustables.

#### 1.2.1.6 Percloroetileno

Líquido incoloro, no inflamable y estable a temperatura ambiente, tiende a evaporarse en el aire produciendo un olor parecido al éter que se puede detectar en concentraciones bajas, sin embargo, después de un corto período de tiempo el olor puede pasar desapercibido, convirtiéndose así en una señal de advertencia poco fidedigna. (Percloroetileno:<http://www.compromisorse.com/sabias-que/2010/03/30/que-es-el-percloroetileno/>)

### 1.2.1.6.1 Datos generales del percloroetileno

**Tabla 1-1:** Propiedades generales del percloroetileno

DATOS GENERALES	
Nombre sistemático, Nombre comercial	Tetracloroetileno
Otros nombres	Percloroetileno, Percloroetileno, PERC
Formula molecular	C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>
Masa molecular	165,83 g/mol
Apariencia	líquido incoloro
Numero CAS	[127-18-4]
Estructura	

Realizado por: ANDRADE W., Laboratorio Control de Calidad inducalsa, 2014  
Fuente: <http://www.dirsadisolventes.com/pdf/FDS%20PERCLOROETILENO.pdf>

### 1.2.1.6.2 Propiedades Físico-químicas del percloroetileno

**Tabla 2-1:** Propiedades físico-químicas del percloroetileno

PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS	
Estado de agregación	Líquido
Color	Incoloro
Olor	Característico al éter
Punto de ebullición	121°C
Punto de fusión	-22°C
Densidad relativa (agua = 1)	1.621 g/mL
Solubilidad en agua, g/100 ml a 20°C	0.015
Presión de vapor, kPa a 20°C	1.9
Densidad relativa de vapor (aire = 1)	5.8
Densidad relativa de la mezcla vapor / aire a 20°C (aire = 1)	1.09

Realizado por: ANDRADE W., Laboratorio Control de Calidad inducalsa, 2014  
Fuente: <http://www.dirsadisolventes.com/pdf/FDS%20PERCLOROETILENO.pdf>

### 1.2.1.6.3 Síntesis del percloroetileno

Cloración de compuestos orgánicos de 1-3 átomos de carbono en condiciones de (600 - 800 °C) con (0,2 - 1 MPa) y destilación fraccionada de los productos obtenidos.

### 1.2.1.6.4 Reactividad

- A 150 °C con el oxígeno del aire forma fosgeno:  $\text{Cl}_2\text{C}=\text{CCl}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{Cl}_2\text{C}=\text{O}$
- Descompone por humedad lentamente, forma vapor tóxico y corrosivo (HCl, ácido tricloroacético).
- Con metales alcalinos, alcalinotérreos y aluminio reacciona violentamente.

### 1.2.1.6.5 Usos del percloroetileno

- Limpiar telas en seco.
- Protectores de gamuza.
- Repelentes de agua, silicona y lubricantes para correas.
- Acabados de textiles.

- Limpieza de superficies.
- En limpiadores para frenos de auto.
- Desengrasar metales.
- Quitamanchas.
- Adhesivos.
- Limpiadores de madera.
- Como material inicial para otros productos químicos.

#### 1.2.1.6.6 *Toxicidad*

- Elimina la capa protectora de grasa de la piel.
- A partir de 100 ppm produce irritación de ojos, vías respiratorias, piel y mucosidades.
- La inhalación puede provocar edema pulmonar, cefalea, náuseas, vértigo y estados narcóticos.
- Producir daños irreversibles en el sistema nervioso central, hígado y riñones.
- Peligroso para el medio ambiente, especialmente los acuíferos y la vida acuática
- Efecto CMR (carcinogenicidad, mutagenicidad y toxico para reproducción), puede causar cáncer.
- Efectos de sensibilización. (Exposición: <http://www.dirsadisolventes.com/pdf/FDS%20PERCLOROETILENO.pdf>)

#### 1.2.1.7 *Silicona*

Conjunto de polímeros inorgánicos, su cadena principal no contiene átomos de carbono, la cadena está formada por átomos de silicio y oxígeno intercalados entre sí, cada silicio tiene dos grupos unidos a él, los cuales pueden ser grupos orgánicos; por lo tanto se componen de los elementos Si, O, C y H. Todos los compuestos se basan en una estructura tetraédrica en la que el silicio está rodeado por átomos de oxígeno y radicales orgánicos, su rendimiento se debe a la estructura química y variedad de formas, el nombre apropiado es polisiloxano.

##### 1.2.1.7.1 *Principales propiedades de la silicona*

- Resistentes a temperaturas extremas (-60° a 250°C).
- Resistentes a la intemperie, ozono, radiación y humedad.
- Son hidrófobas, es decir, repelen el agua.
- Resistentes a la deformación.
- Buenas propiedades dieléctricas, lo que les conlleva a ser buenos aislantes.
- Compatibles con el medio ambiente.
- Puntos de fusión bajos.
- Temperaturas de descomposición bajas.

##### 1.2.1.7.2 *Unidades estructurales químicas*

- Monofuncionales: Permite interrumpir de la cadena.
- Difuncionales: Son la columna vertebral de las cadenas macromoleculares.
- Trifuncionales: Producen moléculas ramificadas y forman las bases de resinas.
- Tetrafuncionales: Dan lugar a estructuras con forma de red, similares a los silicatos.

##### 1.2.1.7.3 *Tipos de silicona*

Los grupos metilo pueden girar libremente alrededor de la cadena de -Si-O-Si-, pero en lugar de ellos se pueden unir otros radicales orgánicos diferentes a la columna vertebral de silicio-oxígeno, las siliconas pueden ser aceites lubricantes y elastómeros que significa caucho que puede rebotar y ser estirados muchas veces su propia longitud, para luego recuperar su forma original, entre estos tenemos:

- Hidrocarburos como el polisopreno o caucho natural.
- Polibutadieno.
- Polisobutileno.
- Poliuretanos.

Los enlaces entre un átomo de silicio y dos átomos de oxígeno unidos son altamente flexibles y el ángulo formado por estos enlaces puede abrirse y cerrarse sin problemas.

### **1.3 Destilación**

Es una operación unitaria física de separación de dos componentes y también de multicomponentes de mezclas líquidas por vaporización parcial, por un equilibrio de fases líquido-vapor, el vapor tiene distinta composición que el líquido de partida y que la composición del residuo.

En la evaporación y secado el objetivo es tener el componente menos volátil debido a que el componente más volátil casi siempre es el agua, la finalidad de la destilación es obtener el componente más volátil, ejemplo de la evaporación es la eliminación del agua de la glicerina evaporando el agua, mientras en la destilación la eliminación del agua del alcohol evaporando el alcohol. (Destilación: JOAQUIN OCON GARCIA Y GABRIEL TOJO BARREIRO, Problemas de ingeniería química, Tomo I, Capítulo 5, Destilación, Pág. 280)

#### **1.3.1 Métodos de destilación**

Hay dos métodos de destilación por carga, el primero es produciendo vapor por la ebullición de la mezcla a separar y condensarlo sin retorno de líquido al calderín (sin reflujo externo), el segundo es con retorno de una parte del líquido condensado a la columna (con reflujo externo), los dos métodos se pueden realizar de manera continua o por lotes.

a. Procesos de destilación continua:

- Instantánea.
- Con rectificación.

b. Procesos de destilación discontinua:

- Simple.
- Fraccionada. (VALCARCEL M., Técnicas de Separación: métodos de destilación, 2ª. España: REVERTE, 1988, Pp. 159,160)

#### **1.3.2 Tipos de destilación**

##### **1.3.2.1 Destilación binaria o simple**

Separa líquidos con puntos de ebullición diferentes más de 30 °C aproximadamente, los vapores producidos se condensan, la presión de los componentes del vapor son diferentes de modo que la ley de Raoult puede descartarse por la insignificante contribución del componente menos volátil, lo que el destilado puede ser bastante puro.

Destalación del vocablo latín destillare, significa vaporizar los líquidos por medio de calor, el destilador binario se usa en laboratorios para purificar un líquido corriente con procesos controlados de vaporización y enfriamiento.

#### **1.3.2.1.1** *Ecuación general de balance de masa*

Si un componente en la corriente de alimentación como de salida de una unidad de proceso continua, y para determinar si la unidad está funcionando tal como se pensó al diseñarla se miden los flujos máxicos de ese componente en ambas corrientes, encontrando que no son las mismas, existen cuatro posibles justificaciones para la diferencia entre los flujos medidos.

- a. La unidad pierde el componente por alguna parte.
- b. El componte se consume como reactivo o se genera como producto dentro de la unidad de proceso.
- c. Se acumula el componente dentro de la unidad (absorción en las paredes).
- d. Datos de medición son erróneos.

Con mediciones correctas y no sin fugas, las otras posibilidades generación o consumo en una reacción y acumulación dentro de la unidad de proceso son las únicas explicaciones para justificarla diferencia entre los flujos de entrada y salida.

Balance de un componente en un sistema en forma general.

$$\text{Entrada} + \text{Generación} - \text{Salida} - \text{Consumo} = \text{Acumulación} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

Entada: a través de los límites del sistema.

Generación: producido dentro del sistema.

Salida: a través de los límites del sistema.

Consumo: dentro del sistema.

Acumulación: dentro del sistema.

La ecuación puede formularse para cualquier material que entra o sale de la operación, puede aplicarse a la masa total o a cualquier especie atómica o molecular presente en el proceso.

#### **1.3.2.1.2** *Ecuación general de balance de energía*

La ecuación general de balance de energía es la siguiente:

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Acumulaci3n} \\ \text{de Energ3a} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{Entrada} \\ \text{de Energ3a} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Salida} \\ \text{de Energ3a} \end{array} \right] \quad \text{Ecuaci3n 2}$$

D3nde:

$E_{sist}(t)$  = energ3a total interna (interna + cin3tica + potencial) de un sistema.

$m_{ent}$  y  $m_{sal}$  = flujos m3sicos de las corrientes de entrada y salida del sistema.

$t + \Delta t$  = tiempo, propiedades de corrientes de entrada y salida permanecen aproximadamente constantes.

Los t3rminos de la ecuaci3n son:

$$\begin{aligned} \text{Acumulaci3n} = E_{sist}(t + \Delta t) - E_{sist}(t) = U_{sist}(t + \Delta t) - U_{sist}(t) \\ + E_{c,sist}(t + \Delta t) - E_{c,sist}(t) + E_{p,sist}(t + \Delta t) - E_{p,sist}(t) \end{aligned} \quad \text{Ecuaci3n 3}$$

$$\text{Entrada} = m_{ent} \left( H_{ent} + \frac{v_{ent}^2}{2} + gZ_{ent} \right) \Delta t + Q\Delta t + W_s\Delta t \quad \text{Ecuaci3n 4}$$

$$\text{Salida} = m_{sal} \left( H_{sal} + \frac{v_{sal}^2}{2} + gZ_{sal} \right) \Delta t \quad \text{Ecuaci3n 5}$$

Las entalp3as espec3ficas est3n en par3ntesis, energ3as cin3ticas y potenciales de las corrientes de entrada y salida del sistema;  $Q$  y  $W_s$  son la transferencia de calor y de trabajo de eje, una o todas las variables pueden variar con el tiempo, al sustituir las expresiones dadas para la acumulaci3n, entrada y salida en la ecuaci3n general de balance de energ3a y dividiendo todo entre  $\Delta t$  se tiene:

$$\frac{dU_{sist}}{dt} + \frac{dE_{c,sist}}{dt} + \frac{dE_{p,sist}}{dt} = m_{ent} \left( H_{ent} + \frac{v_{ent}^2}{2} + gZ_{ent} \right) + Q + W_s - m_{sal} \left( H_{sal} + \frac{v_{sal}^2}{2} + gZ_{sal} \right) \quad \text{Ecuaci3n 6}$$

### 1.3.2.2 Destilaci3n fraccionada

Permite separar l3quidos con punto de ebullici3n cercanos y se usa una columna de fraccionamiento, para un mayor contacto entre el vapor con el l3quido condensado que desciende y recibe calor.

### 1.3.2.3 Destilaci3n al vac3o

Requiere mucha energ3a y hay equilibrio liquido-vapor sin problemas a presi3n reducida se produce la vaporizaci3n para obtener productos ligeros sin cambiar su estructura molecular, as3 se complementa la

destilación del crudo procedente de la destilación atmosférica que no se vaporiza a esa presión, porque se descomponen a temperaturas cercanas a su punto de ebullición normal.

#### **1.3.2.4** *Destilación azeotrópica*

Se añade un tercer componente a la mezcla binaria de separación para modificar la volatilidad relativa de los componentes, para separar por la cabeza de la columna un componente, quedando como residuo la mezcla del otro componente y el disolvente agregado, el tercer componente forma una mezcla azeotrópica que es una mezcla líquida de dos o más componentes que tendrán un único punto de ebullición fijo y al pasar al estado de vapor se comporta como un compuesto puro y así separar la mezcla, el azeótropo se puede después separar con diversos procedimientos.

#### **1.3.2.5** *Destilación por arrastre de vapor de agua*

Es una vaporización selectiva del componente volátil de la mezcla y otros no volátiles por inyección directa de vapor de agua en la mezcla de vapor de arrastre, la función es condensarse en el recipiente de ebullición formando otra fase inmiscible que cederá su calor latente a la mezcla a destilar para la evaporación, se tendrá dos fases insolubles en la destilación orgánica y acuosa, cada líquido con su propia presión de vapor como la de un líquido puro a una temperatura de referencia, es necesario que el componente volátil y la impureza sean insolubles en agua y el producto destilado volátil formará dos capas al condensarse, la separación del producto y del agua se realiza por decantación.

En la destilación por arrastre no hay equilibrio de fases líquido-vapor entre los dos componentes a destilar como ocurre en la destilación simple, no se puede realizar diagramas de equilibrio ya que en el vapor no estará el componente no volátil mientras se destila el volátil.

#### **1.3.2.6** *Destilación por lotes o batch*

Usada para pequeños volúmenes de producción, el consumo de energía en la destilación batch es más alto que en la operación continua, pero los productos obtenidos tienen un alto valor económico, la operación se realiza variando la presión y a diferentes relaciones de reflujo durante la obtención de cada uno de los productos y los lotes impuros, el diseño de columnas y operación óptima pueden ser importantes en la reducción de tiempos de batch, con resultados de alta capacidad y mejorar la calidad de los productos con menores tiempos de exposición a altas temperaturas para disminuir la degradación térmica, se usa destilación batch cuando:

- a. El producto principal contiene pequeñas cantidades de impurezas.
- b. Los materiales a separar son producidos en pequeñas cantidades.
- c. La separación se realiza de manera no frecuente.



Para la destilación batch se puede tomar en cuenta lo siguiente:

- I. La composición del producto a obtener:
  - a. Sin reflujo
  - b. Con reflujo, usando:
    - Razón constante de reflujo
    - Razón variable de reflujo
- II. Tiempo para una composición específica del producto a una razón de ebullición constante con:
  - Razón de reflujo constante
  - Razón de reflujo variable

Para el diseño se debe indicar las ecuaciones que rigen el sistema:

Balance total de materiales

$$F = D + W \quad \text{Ecuación 7}$$

Dónde:

F = Alimentación, moles, Kg/h

D = Destilado, moles, Kg/h

W = Residuo, moles, Kg/h

Balance de materiales del componente ligero en mezcla binaria o mezcla compleja

$$F * x_F = D * x_D + W * x_W \quad \text{Ecuación 8}$$

Dónde:

x = Fracción molar en la fase líquida

Balance de materiales alrededor del condensador total

$$V = L + D \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde:

V = Vapor desde la columna, Kg/h

L = Líquido retornando a la columna

- Igual a cero en destilación simple
- En este caso  $V = D$

Por definición

$$\frac{L}{D} = R \quad \text{Ecuación 10}$$

Dónde:

R = Relación de reflujo o relación de reflujo externo.

$$V = D * (R + 1) \quad \text{Ecuación 11}$$

Con esto

Definición de relación de reflujo:

$$\frac{L}{V} = \frac{R}{R+1} \quad \text{Ecuación 12}$$

La volatilidad relativa ( $\alpha$ ) denota las relaciones de equilibrio entre las composiciones del vapor y el líquido como:

$$\alpha = \frac{\frac{y}{x}}{\frac{1-y}{1-x}} \quad \text{Ecuación 13}$$

Dónde:

$\alpha$  = Volatilidad relativa

y = Fracción molar del componente ligero en la fase vapor

Esta relación se representa generalmente como:

$$y = \frac{\alpha \cdot x}{1 + (\alpha - 1) \cdot x}$$

Ecuación 14

### **1.3.3 Factores que intervienen en la destilación**

#### **1.3.3.1 Presión o tensión de vapor**

En un líquido es su valor a una temperatura dada donde existen en equilibrio la fase vapor y líquido, al mantener constante la temperatura y comprimir el vapor sobre el líquido se produce la condensación y no se desprenderá vapor, al expandir se obtendrá una evaporación y pues en el sistema cuando se tiene una menor presión se tendrá por ende una menor temperatura.

#### **1.3.3.2 Temperatura**

Tiene efecto directamente en la volatilidad relativa porque al aumentar la temperatura disminuye la volatilidad relativa de los componentes de una mezcla, pues al disminuir la temperatura en la vaporización aumenta la volatilidad.

Además la temperatura es importante para identificar en qué estado puede estar una sustancia de acuerdo a la naturaleza química del mismo.

#### **1.3.3.3 Volatilidad relativa**

Es la diferencia entre dos componentes a separar de una mezcla de su punto de ebullición, indicando la facilidad o dificultad de separarlos, es decir si tienen una volatilidad cercana entonces su presión de vapor son similares y su punto de ebullición también es cercano, lo que dificulta la separación, pero si son lejanos entonces se facilita la separación.

#### **1.3.3.4 Diagrama Temperatura – Concentración A (x,y)**

Se usan para determinar en los límites de sus dos líneas de expresión la inferior de (x) que representa la fase líquida y la superior de (y) que representa la fase de vapor ambas en el equilibrio, entonces para una determinada concentración de alimentación se tendrá una fracción de (x,y) a una determinada temperatura.

## **1.4 Columna de platos**

En el interior del cilindro se colocan los platos a una determinada distancia, el líquido desciende y el vapor asciende para tener contacto en cada plato, el líquido al llegar al fondo se vaporiza parcialmente por aplicación de calor, el resto del líquido es producto de fondo, el vapor en la parte superior se condensa y una parte regresa como reflujo y el resto es el producto destilado.

El vapor y líquido dependen de la eficiencia del plato en el cual se da el contacto, el número de platos y la relación de reflujo, aunque siempre están cerca del equilibrio de temperatura, presión y composición.

(Columnas de destilación, OCON.J y TOJO.G., Problemas de Ingeniería Química., trad CUERDA.A., 3a ed., Madrid-España., Aligar S.A., 1980., Pp. 309-311)

### **1.4.1 Tipos de platos**

#### **1.4.1.1 Platos con flujo cruzado**

Tienen perforaciones para la dispersión del gas en el líquido, son orificios circulares (platos de malla), el líquido no debe fluir a través de las perforaciones por la acción del gas, cuando el flujo de gas es lento una parte del líquido se drene y se salta zonas de contacto, para ello el plato de válvula minimiza el goteo, la válvula se cierra cuando el flujo de gas es lento, entonces el área total del orificio varía para mantener la presión dinámica en el plato.

#### **1.4.1.2 Platos con flujo en contracorriente**

El líquido y gas pasan por simples perforaciones en forma pulsante, no hay bajantes, su diámetro esta entre 3 y 13 mm o hendiduras largas de ancho entre 6 y 13 mm (bandeja Turbogrid), el plato puede plegarse (bandeja Ripple) para separar parcialmente los flujos gas y líquido.

Para contacto de gases con líquidos que tiene sólidos se utiliza el plato deflector (placa de dispersión), donde el líquido actúa como fase dispersa y el gas como fase continúa.

### **1.4.2 Acción de un plato ideal**

En el plato ideal el líquido y vapor que sale esta en concentraciones de equilibrio, los platos se enumeran desde la parte superior hasta la parte inferior y del plato n partiendo hacia arriba es el plato n-1 y el inferior es n+1. Los subíndices indican el origen, al plato n entran dos corrientes de fluido y salen dos más, una corriente líquida  $L_{n-1}$  mol/h, del plato n-1 y una corriente de vapor  $V_{n+1}$  mol/h, del plato n+1 entran en contacto, una corriente de vapor  $V_n$  mol/h asciende al plato n-1 y una corriente líquida  $L_n$  mol/h, desciende al plato n+1, las concentraciones de las corrientes que entran y salen del plato n son la del vapor que sale del plato  $Y_n$  y la del líquido que sale del plato  $X_n$ .

### **1.4.3 Condición térmica de alimentación**

La línea de operación cambia si pasa una corriente lateral, para lo cual el calor de la alimentación lo permite calcular mediante:

$$L' = L + q * F \quad \text{Ecuación 15}$$

$$V = V' + (1 - q) * F \quad \text{Ecuación 16}$$

Dónde:

L' y V'= Corrientes debajo de la alimentación.

q= Condición térmica, moles líquido saturado en la alimentación por mol de materia alimentada.

**Tabla 3-1:** Condición de alimentación térmica

CONDICION DE ALIMENTACIÓN	MEDIDA
A. Líquido subenfriado	$q > 1$
B. Líquido saturado	$q = 1$
C. Parcialmente vaporizado	$1 > q > 0$
D. Vapor saturado	$q = 0$
E. Vapor sobrecalentado	$q < 0$

Realizado por: ANDRADE W., Laboratorio Control de Calidad inducalsa, 2014

Fuente: PERRY.R., Manual del Ingeniero Químico., 6ta ed., México, McGraw- Hill., Pp. 1331

El vapor de q para alimentación como líquido frío se obtiene a partir de:

$$q = 1 + \frac{C_{pL}(T_b - T_F)}{\lambda} \quad \text{Ecuación 17}$$

## 1.5 Recuperación del percloroetileno mediante la torre de destilación con rectificación

### 1.5.1 Objetivo

La torre de destilación con rectificación permite recuperar el percloroetileno a partir del residuo generado por la actividad de lavado de suelas en la industria inducalsa el solvente a una pureza aceptable debido a que el producto obtenido posee las mismas características que el original lo que lo hace apto para su reutilización y tener un ahorro económico la industria, además disminuyendo la contaminación al ambiente, en las pruebas realizadas en laboratorio con un equipo de destilación simple se obtuvo resultados favorables y se enviaron pruebas analizar en el laboratorio acreditado de Análisis Instrumental de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH, mediante espectro IR se denota la semejanza del destilado con el producto original.

### 1.5.2 Principio de operación

La operación de destilación mediante la columna con rectificación tiene lugar iniciando con el calentamiento de la sustancia a tratar en el tanque de ebullición a un volumen de 86,27 L, su respectiva evaporación del componente más volátil que sale por el cono superior y asciende por la columna de platos, llega al domo y se condensa en un condensador total, una parte del condensado regresa como reflujo a la columna donde se establece un equilibrio del líquido que desciende y el vapor que asciende, el resto es recolectado en un recipiente para ser almacenado para su posterior uso en el lavado de suelas

en la canastilla, a continuación se presenta una explicación generalizada de las partes que conforman la torre de destilación.

**a. Tanque de ebullición**

Empleado para depositar la mezcla de percloroetileno-silicona y realizar la evaporación del componente más volátil aplicándole calor mediante cuatro resistencias internas.

**b. Resistencias de Inmersión**

Las resistencias de inmersión convierten energía eléctrica en calor, la mayoría son fabricadas con un alambre de una aleación de níquel 80% y cromo 20%, esta aleación soporta temperaturas muy altas de 1000 °C, es muy inoxidable.

**c. Nivel de Solvente**

Permite regular la cantidad de líquido dentro del tanque de ebullición, además es el que indica el límite máximo de fluido por seguridad de operación del equipo.

**d. Tanque de alimentación**

Donde se coloca la mezcla percloroetileno-silicona inicialmente, además cae de la columna una parte la cual se envía al tanque de ebullición a través de una bomba.

**e. Bomba**

Permite transportar el líquido del tanque de alimentación hacia el tanque de ebullición.

**f. Válvula de bola**

Permite regular la cantidad de líquido que se envía desde el tanque de alimentación hacia la columna de platos, también en el condensador el agua.

**g. Columna de platos**

Es por donde asciende el vapor desde el tanque de ebullición y también por donde desciende el líquido condensado teniendo contacto en los platos estableciéndose un equilibrio.

**h. Condensador total**

Empleado para convertir el vapor del componente más volátil en líquido, mediante la transferencia de energía del vapor hacia el agua de refrigeración los cuales dichos fluidos no tienen contacto directo.

**i. Distribuidor de corriente**

Es un motor calibrado para girar un disco con una saliente que representa un 25% del flujo del líquido condensado, representando un 75% del disco que gira el reflujo en la torre de destilación, empleándose un embudo que recorre el espacio proporcional del disco.

**j. Tubería PVC**

Cumple la función de transportar agua hacia el condensador.

**k. Medidor termómetro**

Permite que el operario verifique que la operación se realiza dentro de los límites establecidos.

**l. Tanque de almacenamiento**

Permite almacenar el líquido destilado para estar en disposición en el momento que sea requerido para la actividad del lavado de suelas.

**m. Disposición adecuada de los productos de cola**

Como resultado del proceso de destilación se obtiene el producto destilado y el producto o residuo de cola, mismos que serán drenados después de cada batch, para almacenarlos y que el gestor le dé disposición final.

## **1.6 Diseño**

### **1.6.1 Tanque de alimentación, ebullición y almacenamiento**

Son figuras geométricas de determinado volumen que permiten el alojamiento de una cantidad de fluido líquido con propiedades a diferentes temperaturas.

#### **1.6.1.1 Densidad**

La densidad es la relación de masa en determinado volumen, característica de cada líquido en determinadas temperaturas.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$V = \frac{m}{\rho} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$m = \rho * V \quad \text{Ecuación 20}$$

Dónde:

$\rho$ = Densidad, Kg/L, Kg/m<sup>3</sup>

V= Volumen, L, m<sup>3</sup>

m= Masa, Kg

#### **1.6.1.2 Volumen de un cono**

El volumen de un cono está representado por la siguiente ecuación:

$$V = \frac{1}{3} * \pi * r^2 * h \quad \text{Ecuación}$$

$$h = \frac{3 \cdot v}{\pi \cdot r^2} \quad \text{Ecuación 22}$$

Dónde:

V = Volumen, L, m<sup>3</sup>

r = Radio, m

h = Altura, m

### 1.6.1.3 Volumen de un cilindro

El volumen de una figura cilíndrica relaciona su diámetro y altura con un valor constante frente a un valor numérico, representada por:

$$v = \frac{\pi \cdot \phi^2 \cdot h}{4} \quad \text{Ecuación 23}$$

$$h = \frac{4 \cdot v}{\pi \cdot \phi^2} \quad \text{Ecuación 24}$$

Dónde:

V = Volumen del cilindro, L, m<sup>3</sup>

$\phi$  = Diámetro, m

h = Altura, m

## 1.6.2 Ecuaciones para el diseño de la torre de destilación, método de MC Cabe

### 1.6.2.1 Cálculo de capacidad calorífica promedio

Es el cambio de temperatura que experimenta un cuerpo por mayor o menor dificultad por aplicación de calor en forma de energía calorífica.

Autor: Joseph Black

La Ecuación es:

$$(\overline{Cp}) = \sum Xi Cp_i \quad \text{Ecuación 25}$$

Dónde:

X<sub>i</sub> = Fracción molar

C<sub>p*i*</sub> = Capacidad Calorífica media, Kcal/Kg °C

### 1.6.2.2 Cálculo del calor latente medio

Es la energía necesaria para producir un cambio de fase liberando o absorbiendo energía.

Autor: Joseph Black

La Ecuación es:

$$\lambda F = \sum Xi \lambda_i \quad \text{Ecuación 26}$$

Dónde:

X<sub>i</sub> = Fracción molar

$\lambda F$  = Calor latente, Kcal/Kg

### 1.6.2.3 Cálculo del parámetro f de alimentación

Es el número de moles de vapor que resultan en la sección de rectificación de la introducción de cada mol de alimentación, empleada para determinar el tipo de alimentación a la torre.

La Ecuación para el Cálculo del parámetro  $f$  de Alimentación es:

$$f = \frac{Cp(T_b - T_F)}{\lambda F} \quad \text{Ecuación 27}$$

Dónde:

$T_b$ =Temperatura de ebullición medio, °C

$T_F$ =Temperatura de alimentación, °C

$CP$ = Capacidad calorífica media, Kcal/Kg °C

$\lambda F$ =Calor latente medio, Kcal/Kg

#### 1.6.2.4 Cálculo de la pendiente

Relaciona la unidad y el flujo de alimentación, determina el tipo de alimentación que ingresará a la columna, la ecuación es:

$$m = \frac{-(1-f)}{f} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$\Phi = \arctg(m) \quad \text{Ecuación 29}$$

Dónde:

$f$  =Factor de alimentación

$\Phi$  =Angulo del argumento, m

#### 1.6.2.5 Curva de equilibrio

Se emplean los datos de equilibrio del componente de más volátil, representando el equilibrio de las composiciones en fase de vapor para cada valor de la composición en la fase líquida.

#### 1.6.2.6 Recta de alimentación

Se la construye con el cálculo del eje  $y$ , se traza una línea que pase por la intersección de  $X_F$ .

$$y = \frac{X_F}{f} \quad \text{Ecuación 30}$$

Dónde:

$X_F$ = fracción de la alimentación.

$f$  = factor de alimentación

#### 1.6.2.7 Cálculo de la relación de reflujo mínimo

Permite obtener el número infinito de platos para la separación deseada, se refiere a un flujo mínimo de vapor en la torre para dimensiones mínimas del tanque de ebullición y condensador.

Autor: Fenske

La ecuación es:

$$\frac{X_D}{R_D \min + 1} = \text{valor interpolado} \quad \text{Ecuación 31}$$



Dónde:

$X_D$  = Fracción del destilado

$R_{D \min}$  = Reflujo mínimo

Permite efectuar una separación determinada, se puede elegir arbitrariamente una relación de reflujo dentro de ciertos límites, y de esta relación de reflujo depende el coste de funcionamiento y el coste del aparato.

#### 1.6.2.8 *Cálculo de la relación de reflujo total*

Es el número mínimo de platos que se puede utilizar para obtener la separación deseada, además se puede identificar que al aumenta la relación de reflujo aumenta el coste de funcionamiento de la columna y disminuye el coste del aparato; cuando la relación de reflujo llega a alcanzar el valor unitario, la columna trabaja a reflujo total.

Autor: Fenske

La Ecuación para el Cálculo de la Relación de Reflujo Total es:

$$R_T = k R_{D \min} \quad \text{Ecuación 32}$$

Dónde:

$K$  = Número de veces el reflujo mínimo

$R_{D \min}$  = Reflujo mínimo

#### 1.6.2.9 *Recta de rectificación*

La recta se construye a partir del eje y trazando un línea que pasa por la intersección del punto  $X_D$  con la línea de 45°.

La Ecuación para el Cálculo de la Recta de Rectificación es

$$y = \frac{x_D}{R+1} \quad \text{Ecuación 33}$$

Dónde:

$y$  = eje.

$X_D$  = fracción del destilado.

$R_D$  = relación de reflujo.

#### 1.6.2.10 *Recta de agotamiento*

Se construye trazando una línea que pase por el punto  $X_w$  (fracción del residuo) por la intersección de la línea de rectificación con la línea de alimentación.

#### 1.6.2.11 *Platos teóricos*

Es un segmento de columna en donde se alcanza el equilibrio entre el vapor que se condensa y el líquido que se evapora, se obtiene realizando líneas horizontales y verticales partiendo del punto de la intersección de la fracción de destilado  $X_D$  y la línea de  $45^\circ$  con una línea horizontal de derecha a izquierda hasta llegar a la curva de equilibrio, después desde la curva de equilibrio hacia abajo hasta la línea de operación de la zona de rectificación, nuevamente una línea hasta llegar a la curva de equilibrio y así sucesivamente hasta llegar al punto donde el plato que se encuentre dentro de la fracción de residuo  $X_W$ .

Para obtener el número de platos teóricos se realiza el conteo de arriba hacia abajo.

#### **1.6.2.12** *Balance de masa*

Permite obtener valores de masa o flujo en la operación que evidencie la conservación de la materia, para poder calcular la composición del residuo y destilado, la ecuación es:

$$\mathbf{F = D + W} \qquad \text{Ecuación 7}$$

Dónde:

F=Alimentación

D=Destilado

W=Residuo

#### **1.6.2.13** *Balance de masa parcial*

La suma de las cantidades o concentraciones de todas las especies debe ser igual a la cantidad introducida en el sistema.

La Ecuación para el Cálculo del Balance de Masa Parcial es:

$$\mathbf{F * x_F = D * x_D + W * x_W} \qquad \text{Ecuación 8}$$

Dónde:

F=Alimentación

$x_F$ =Fracción de alimentación

D=Destilado

$x_D$ =Fracción de destilado

W=Residuo

$x_W$ =Fracción de residuo

#### **1.6.2.14** *Cálculo de la temperatura promedio de la columna*

Es una magnitud escalar que está relacionada directamente con la parte de la energía interna conocida como "energía cinética", que es la energía asociada a los movimientos de las partículas del sistema en forma de vibraciones.

La Ecuación para el Cálculo de la Temperatura Promedio de la Columna es:

34 
$$\text{MEDIA ARITMETICA} = \sum Ti/n$$
 Ecuación

35 
$$\text{MEDIA GEOMETRICA} = \prod Ti^{1/n}$$
 Ecuación

36 
$$T = \sum Ti/n$$
 Ecuación

### 1.6.2.15 Cálculo de la volatilidad relativa y viscosidad

#### 1.6.2.15.1 Cálculo de la volatilidad relativa

La volatilidad depende de las presiones de vapor de los componentes y de las concentraciones de la fase líquido y vapor, permite ver hasta qué punto se produce la separación, la ecuación es:

$$\alpha = \frac{y(1-x)}{x(1-y)}$$
 Ecuación 37

#### 1.6.2.15.2 Cálculo de la fluidez

La fluidez permite a los líquidos y gases pasar por orificio pequeños, siempre que esté a un mismo o inferior nivel de contenido, la ecuación es:

38 
$$\phi = \sum \frac{1}{\mu} Xi$$
 Ecuación

39 
$$\phi = \frac{1}{\mu}$$
 Ecuación

Dónde:

$\phi$  = fluidez.

$\mu$  = viscosidad.

Permite determinar el movimiento de las colisiones de partículas contenidas en un líquido o un gas.

#### 1.6.2.15.3 Cálculo de la viscosidad

En líquidos indica la dificultad con que fluyen, entre menor fluidez es más viscoso, por el rozamiento de partículas que disminuyen su movilidad, la ecuación es:

40 
$$\mu = \frac{1}{\phi}$$
 Ecuación

Dónde:

$\phi$  = fluidez

$\mu$  = viscosidad

La viscosidad se emplea para determinar el tipo de equipo para transportar un fluido.

### 1.6.2.16 Cálculo de los platos reales

Se debe al rendimiento de separación por el número de platos teóricos respecto a los platos reales.

Autor: Murphree

Los valores de eficiencia aproximados para destilación de hidrocarburos son del 50% al 85% y para absorción del 10 al 50%, la gráfica de OCONNELL indica la eficiencia de los platos, la ecuación es:

$$E_o = \frac{N_T}{N_R} \quad \text{Ecuación 41}$$

$$N_R = \frac{N_T}{E_o} \quad \text{Ecuación 42}$$

$$P \text{ ALIMENTACION} = \frac{\phi}{E_o} \quad \text{Ecuación}$$

43

Dónde:

Eo = Eficiencia de los platos

NT = Número de platos teóricos

NR = Número de platos reales

### 1.6.2.17 Cálculo del diámetro

#### 1.6.2.17.1 Zona de rectificación

##### 1.6.2.17.1.1 Cálculo de la masa molecular media

Es la masa de una molécula debido a la cantidad que la compone de una sustancia, la ecuación es:

$$M = (X_{D \text{ PERC}} * PM_{\text{PERC}}) + (X_{D \text{ SILICONA}} * PM_{\text{SILICONA}}) \quad \text{Ecuación 44}$$

Dónde:

M = Masa molecular media, Kg/Kmol

Mi = Masa molecular, Kg/Kmol

Xi = Fracción molar.

Se utiliza para determinar la masa molecular media de la alimentación que está ingresando por el plato de alimentación de la torre de destilación.

##### 1.6.2.17.1.2 Cálculo del caudal de vapor

Es el vapor procedente del líquido alimentado al equipo de acuerdo a concentraciones de los elementos que integran la mezcla, la ecuación para el cálculo del caudal de vapor es:

$$V = D(1 + RT) \quad \text{Ecuación 45}$$

Dónde:

V= Volumen de la solución, Kg/h

D= Destilado, Kg/h

RT= Reflujo externo

El caudal de vapor es necesario para el contacto entre la fase líquida y gaseosa en la torre.

#### 1.6.2.17.1.3 Cálculo de flujo del gas

Es la cantidad de gas que recircula en el interior de la torre de destilación, con la distancia entre platos interpolamos en el diagrama de BROWN SOUDERS para obtener una constante C=40, para el cálculo de la densidad del gas  $\rho_v$  se utiliza el valor de compresibilidad de 0,804 valor referente a las propiedades conjugadas del peso molecular semejante del Docosano al del percloroetileno, así como valores del etileno y el cloro.

La Ecuación para el Cálculo de Flujo del Gas es:

$$G = C[\rho_v(\rho_L - \rho_v)]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 46}$$

Dónde:

G= Flujo del gas.

C= Distancia entre platos, m

$\rho_L$ = Densidad del líquido, Kg/m<sup>3</sup>

$\rho_v$ = Densidad del vapor, Kg/m<sup>3</sup>

#### 1.6.2.17.1.4 Cálculo del área en la zona de rectificación

El área indica la superficie en este caso la de la zona de rectificación.

La Ecuación que determina el Área en la Zona de Rectificación es:

$$A = \frac{V}{G} \quad \text{Ecuación 47}$$

Dónde:

A= Área, m<sup>2</sup>

V= Volumen, Kg/h

G= Flujo del gas

#### 1.6.2.17.1.5 Cálculo del diámetro de la columna en la zona de rectificación

Determina el diámetro interno del cilindro de la torre.

La Ecuación del Diámetro de la Columna en la Zona de Rectificación es:

$$\phi = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad \text{Ecuación 48}$$

Dónde:

$\emptyset$ = Diámetro, m

A= Área, m<sup>2</sup>

### 1.6.2.17.2 Zona de agotamiento

#### 1.6.2.17.2.1 Cálculo del caudal de vapor medio

La Ecuación para el Cálculo del Caudal de Vapor Medio producido en la torre es:

$$\bar{V} = V - f * F \quad \text{Ecuación 49}$$

Dónde:

$\bar{V}$ = Caudal de vapor medio, Kg/h

V = Volumen, Kg/h

f = Número de moles de vapor que resultan en la sección de rectificación de la introducción de cada mol de alimentación.

F = Alimentación, Kg/h

### 1.6.2.18 Cálculo del diámetro promedio

La Ecuación para el Cálculo del Diámetro Promedio representa dimensiones de la columna mediante la siguiente ecuación:

$$\emptyset = \frac{\emptyset_R + \emptyset_A}{2} \quad \text{Ecuación 50}$$

Dónde:

$\emptyset_R$ =Diámetro de la zona de rectificación, m

$\emptyset_A$ =Diámetro de la zona de agotamiento, m

En el diseño de la torre se duplica el diámetro promedio como parámetro de diseño necesario para la economía de la torre en cuanto a disminución de platos y longitud total, considerando la acción de un plato ideal realmente en el equilibrio térmico de la eficiencia de cada plato.

### 1.6.2.19 Cálculo de la longitud

Es una medida para indicar las dimensión de los objetos.

La Ecuación es:

$$L = (N - 1)d + 1,5d + 2d \quad \text{Ecuación 51}$$

Dónde:

N= Número de platos reales.

d = Diámetro, m

### 1.6.3 Cálculos de la dinámica de los platos

#### 1.6.3.1 Cálculo de parámetro de flujo líquido – vapor

La ecuación representa el parámetro de flujo tanto de líquido como de vapor empleado en la determinación del porcentaje de inundación.

$$F_{lv} = \frac{L}{V} * \left(\frac{\rho_V}{\rho_L}\right)^{0,5} \quad \text{Ecuación 52}$$

Dónde:

$F_{lv}$ = Parámetro de flujo líquido - vapor

L= Gasto máximo del líquido, Kg/h

V= Gasto máximo del vapor, Kg/h

#### 1.6.3.2 Determinación del factor de capacidad

El factor de capacidad es para obtener la capacidad de inundación de la columna se la hallar en la gráfica  $C_{sb,graf}$  con los valores de diámetro de la columna y la distancia entre platos en referencia al parámetro de flujo líquido – vapor, para este estudio el valor cercano de diámetro de columna es 0,305 m y el valor representado de  $C_{sb,graf}$  es 0,058, la ecuación es la siguiente:

$$C_{sb.inundación} = C_{sb,graf} * \left(\frac{\sigma}{20}\right)^{0,2} \quad \text{Ecuación 53}$$

Dónde:

$C_{sb.inundación}$ = Capacidad de inundación

$\sigma$ = Tensión superficial, mN/m

#### 1.6.3.3 Determinación del porcentaje de inundación

El porcentaje de inundación representa si la bajante de la columna debe ser mayor o menor, en casos solo empleando las perforaciones en los diferentes tipos de platos.

$$U_{inundación} = \frac{C_{sb.inundación}}{\left(\frac{\rho_V}{\rho_L - \rho_V}\right)^{0,5}} \quad \text{Ecuación 54}$$

Dónde:

$U_{inundación}$ = Porcentaje de inundación, %

#### 1.6.3.4 Cálculo de eficiencia

Se obtiene en la columna mediante la cantidad de platos teóricos respecto a la cantidad de platos reales empleados para realizar la separación del componente a la pureza deseada.

$$E = \frac{\text{Platos teóricos}}{\text{Platos reales}} \quad \text{Ecuación 55}$$

Dónde:

E=Eficiencia de plato

### 1.6.3.5 Eficiencia húmeda de la columna; por arrastre fraccional

El arrastre máximo económicamente permitido es de 0,15, se obtiene en la gráfica con el parámetro de flujo líquido – vapor y el porcentaje de inundación; es necesario para hallar la eficiencia húmeda, la eficiencia seca de Murphy como valor aproximado es de 0,7, la ecuación es la siguiente:

$$E_H = \frac{E_m}{1 + \left(\frac{E_m * \varphi}{1 - \varphi}\right)} \quad \text{Ecuación 56}$$

Dónde:

$E_H$ = Eficiencia húmeda de la columna por arrastre fraccional

$\varphi$ =Relación de arrastre

$E_m$ =Eficiencia seca de Murphy

### 1.6.3.6 Diámetro de gotas formadas en el interior de la torre

El diámetro de las gotas que se forman en el interior de las columnas es muy necesario en consideración respecto al diámetro de perforación que se requiere en el tipo de plato que se escoja.

$$d_T = \sqrt{\frac{\sigma}{\Delta\rho * g}} \quad \text{Ecuación 57}$$

57

Dónde:

$d_T$ = Diámetro de gotas, mm

$\sigma$ = Tensión superficial del líquido para sistemas de gas/líquido,  $\text{mNm}^{-1}$

$\Delta\rho$ =Variación de la densidad,  $\text{Kg/m}^3$

$g$ = Gravedad,  $\text{m/s}^2$

CRITERIO:

Generalmente se utilizan diámetros de orificios de 3 a 12 mm y frecuentemente de 4,5 mm.

Autor: Fair and Green, 1997

Para casos de 3 a 12 mm de diámetro de orificio el número de perforaciones son 39.

Los orificios se colocan en los vértices de triángulos equiláteros a distancias entre los centros de 2,5 a 5 de diámetro de los orificios.

Autor: Treybal, 1981

### 1.6.4 Diseño del condensador



Es un equipo de transferencia de calor que permite obtener sustancias a determinada temperatura de operación produciendo cambio o no de fase dependiendo del tipo de fluido a tratar.

#### 1.6.4.1 *Calor latente*

Es la energía que necesita o libera un cuerpo para cambiar de fase, como de líquido a gas.

Autor: Joseph Black

$$Q_L = m * h_{fg} \quad \text{Ecuación 58}$$

Dónde:

$Q_L$ = Calor latente, KJ/h

$m$ = Flujo de masa Kg/h

$h$ = Entalpia, KJ/Kg

#### 1.6.4.2 *Calor sensible*

Cambio de temperatura por calor suministrado como energía calorífica transferida a un cuerpo.

Autor: Joseph Black

$$Q_s = m * C_p * \Delta T \quad \text{Ecuación 59}$$

Dónde:

$Q_s$ = Calor sensible, KJ/h

$m$ = Flujo de masa Kg/h

$C_p$ = Capacidad Calorífica, Kcal/Kg °C

$\Delta T$ = Variación de temperatura, °C

#### 1.6.4.3 *Calor extraído por el condensador*

Representa una efectividad funcional correcta del condensador si las cantidades de energía en calor latente y calor sensible son extraídas de un fluido determinado, en este caso representada por la siguiente ecuación:

$$Q_T = Q_L + Q_s \quad \text{Ecuación 60}$$

Dónde:

$Q_T = Q_{\text{CONDENSADOR}} = \text{KJ/h}$

#### 1.6.4.4 *Determinación de la LMTD*

La temperatura media logarítmica indica variaciones de temperatura de fluidos en diferentes condiciones de temperatura y diferentes propiedades para un punto operacional como el de lograr una condensación requerida en cambio de fase.

$$\Delta T_A = T_{hi} - T_{co} \quad \text{Ecuación 61}$$

$$\Delta TB = T_{ho} - T_x \quad \text{Ecuación 62}$$

$$\Delta TC = T_{ho} - T_{ci} \quad \text{Ecuación 63}$$

$$LMTD_c = \frac{\Delta TA - \Delta TB}{\ln \frac{\Delta TA}{\Delta TB}} \quad \text{Ecuación 64}$$

$$LMTD_e = \frac{\Delta TB - \Delta TC}{\ln \frac{\Delta TB}{\Delta TC}} \quad \text{Ecuación 65}$$

Dónde:

LMTD= Temperatura media logarítmica, °C

LMTD<sub>c</sub>= Temperatura media logarítmica de condensación, °C

LMTD<sub>e</sub>= Temperatura media logarítmica de enfriamiento, °C

ΔT= Variación de temperatura, °C

T<sub>ci</sub> = Temperatura del fluido frio a la entrada, °C

T<sub>co</sub>= Temperatura del fluido frio a la salida, °C

T<sub>hi</sub> = Temperatura del fluido caliente a la entrada, °C

T<sub>ho</sub>= Temperatura del fluido caliente a la salida, °C

T<sub>x</sub>= Temperatura de cambio de los fluidos, °C

#### 1.6.4.5 Balance de energía

La cantidad de energía en una operación tiene resultados en pérdidas, acumulación y salida que compensa la conservación de la misma.

$$Q_R + H_F = Q_C + H_D + H_W + Q_P \quad \text{Ecuación 66}$$

66

Dónde:

Q<sub>R</sub>= Calor suministrado por las resistencias

H<sub>F</sub>= Entalpia de alimentación

Q<sub>C</sub>= Calor extraído por el condensador

H<sub>D</sub>= Entalpia del destilado

H<sub>W</sub>= Entalpia del residuo

Q<sub>P</sub>= Calor perdido

Se utiliza para determinar la cantidad de calor que pasa de las resistencias hacia el fluido, para conocer la cantidad de calor que es aprovechado en el tanque de ebullición del equipo de destilación.

$$Q - W = \Delta E \quad \text{Ecuación 67}$$

Dónde:

Q=transferencia neta de energía por calor

W=trabajo

ΔE=cambio de energía en el equipo (interna, cinética, potencial)

Para una operación a volumen constante se tiene:

$$Q - W = H \quad \text{Ecuación 68}$$

La entalpia se puede representar en función de la capacidad calorífica y el gradiente de temperatura, por lo cual se tiene:

$$H = m * C_p * (T_o - T_i) \quad \text{Ecuación 69}$$

Dónde:

m: Cantidad de la mezcla, Kg/h

C<sub>p</sub>: Calor específico de la mezcla, Kcal/Kg°C

T<sub>o</sub>: Temperatura final del producto en el tanque, °C

T<sub>i</sub>: Temperatura inicial del producto en el tanque, °C

#### 1.6.4.6 *Calor aprovechado*

Denota la cantidad de calor que está siendo aprovechado por el equipo.

$$Q = M_w H_w + M_D H_D + M_F H_F \quad \text{Ecuación 70}$$

Dónde:

Q=calor aprovechado, KJ/h

M<sub>w</sub>=masa del residuo de fondo, Kg/h

H<sub>w</sub>=entalpia del residuo de fondo, KJ/Kg

M<sub>D</sub>=masa del destilado, Kg/h

H<sub>D</sub>=entalpia del destilado, KJ/Kg

M<sub>F</sub>=masa de la alimentación, Kg/h

H<sub>F</sub>=entalpia de la alimentación, KJ/Kg

#### 1.6.4.7 *Calor suministrado*

Demuestra la cantidad de calor que se está suministrando al equipo, aquí el valor del calor suministrado es por las resistencias.

$$Q_R = P_R * J/s \quad \text{Ecuación 71}$$

Dónde:

Q<sub>R</sub>=calor suministrado, KJ/h

P<sub>r</sub>=potencia que disipa la energía

J/s=voltios

#### 1.6.4.8 *Área de transferencia de calor*

Para equipos que tienen resistencias de inmersión se tiene:

$$A = \pi * \emptyset * L * N_r \quad \text{Ecuación 72}$$

Dónde:

N<sub>r</sub>: número de resistencias a usarse

A= Área, m<sup>2</sup>

#### 1.6.4.9 *Coeficiente de transferencia de calor*

Para el cálculo de la velocidad de transferencia de calor en el equipo de destilación, se emplea el concepto de un coeficiente total de transferencia de calor respecto al área de administración de calor.

$$Q = U * A * \Delta T \quad \text{Ecuación 73}$$

$$U = \frac{q}{A \Delta T} \quad \text{Ecuación 74}$$

Dónde:

U=coeficiente total de transferencia de calor, KJ/ hm<sup>2</sup>°C

A=área de transferencia de calor, m<sup>2</sup>

ΔT=gradiente de temperatura, °C

#### 1.6.4.10 Eficiencia

Es la relación entre la cantidad de calor aprovechado y la cantidad de calor suministrado.

$$n = Q/Q_R \quad \text{Ecuación 75}$$

Dónde:

ñ=eficiencia

Q=calor aprovechado, KJ/h

Q<sub>R</sub>=calor suministrado, KJ/h

$$\text{Eficiencia} = \frac{Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{salida}}}{Q_{\text{entrada}}} * 100 \quad \text{Ecuación}$$

76

Dónde:

Q<sub>entrada</sub>=calor de entrada, KJ/h

Q<sub>salida</sub> =calor de salida, KJ/h

#### 1.6.5 Rendimiento de equipo

El rendimiento representa la cantidad de producto obtenido frente a una cantidad de materia empleada para obtenerlo expresado como:

$$\text{Rendimiento} = \frac{V_{\text{salida}}}{V_{\text{entrada}}} * 100 \quad \text{Ecuación}$$

77

Dónde:

V= Volumen, L

#### 1.6.6 Componentes para el equipo de destilación

##### 1.6.6.1 Materiales

En la selección de materiales para la construcción de la torre de destilación, hay que tomar en cuenta la resistencia a la corrosión, durabilidad, limpieza, costo, manipulación entre otros.

##### 1.6.6.2 Acero inoxidable

El acero inoxidable es de alta pureza y resistente a la corrosión, dado que el cromo, u otros metales que contiene, posee gran afinidad por el oxígeno y reacciona con él formando una capa pasivadora,

evitando la corrosión del hierro los metales puramente inoxidables que no reaccionan con oxígenos son oro y platino, y de menor pureza se llaman resistentes a la corrosión, como los que contienen fósforo. Sin embargo, esta capa puede ser afectada por algunos ácidos, dando lugar a que el hierro sea atacado y oxidado por picaduras generalizadas. Algunos tipos de acero inoxidable contienen además otros elementos en su aleación, los principales son el níquel y el molibdeno.

Los aceros inoxidables se utilizan principalmente en cuatro tipos de mercados:

- Electrodomésticos: grandes electrodomésticos y pequeños aparatos para el hogar.
- Automoción: especialmente tubos de escape.
- Construcción: edificios y mobiliario urbano (fachadas y material).
- Industria: alimentación, productos químicos y petróleo.

Su resistencia a la corrosión, sus propiedades higiénicas y sus propiedades estéticas hacen del acero inoxidable un material muy atractivo para satisfacer diversos tipos de demandas, como loes la industria médica.

#### 1.6.6.3 Bomba, Tuberías y accesorios

Para transportar el fluido de un lugar a otro se emplea la bomba y para realizar esta construcción sería oportuno trabajar con tubería de ½ a ¾, de 1 pulgada en PVC al igual que los accesorios.

#### 1.6.6.4 Válvula de bola

Las válvulas de bola empleadas para dejar fluir un fluido en cierta cantidad y ser bloqueado su flujo.

#### 1.6.6.5 Lana de vidrio

Es un material empleado como aislante para impedir la pérdida de calor de un equipo y así mejorar la eficiencia energética del mismo para aprovechar la energía que emite la fuente.

#### 1.6.6.6 Resistencia eléctrica

Modelo de resistencia tubular de inmersión cabezal tipo copa con rosca para el calentamiento de líquidos de gran densidad, mediante un tubo de 1/2" - rosca macho, acoplado a calefactor por dentro del cabezal, es un calefactor en tubo de acero inoxidable. AISI 321 ó ASI 316L.

**Tabla 4-1:** Características de resistencia copa rosca - centrada

ZONA DE CALOR °C	Ø <sub>INT</sub> m	COTA L cm	COTA D cm	W	V	MATERIAL	W/°CM <sub>2</sub>
165	0.020	20	8	1200	220	AISI 321 8Ø	4,0

Fuente: Características resistencia copa rosca, [www.resistenciasalona.com/pdf/liquido2.doc](http://www.resistenciasalona.com/pdf/liquido2.doc)

## CAPITULO II

### 2 PARTE EXPERIMENTAL

Al realizar el estudio para el diseño del sistema de recuperación de PERC por destilación se inició realizando prácticas de laboratorio para obtener los parámetros necesarios para dimensionar el equipo y su correcta operación, el estudio realizado conjuntamente con la información literaria permitió escoger la mejor forma de hacer este proyecto siguiendo un lineamiento preestablecido para el proceso práctico y observar si se cumple con los objetivos planteados para obtener buenos resultados.

#### 2.1 Metodología

##### 2.1.1 *Plan de muestreo*

Se procedió a un muestreo aleatorio simple, ya que se analizará solo las muestras provenientes del lavado de suelas y obtener las variables pertinentes para el dimensionamiento del equipo para recuperar el solvente.

La frecuencia de muestreo será diaria, por un lapso de cuatro semanas, recolectando una muestra todos los días de la semana de Lunes a Viernes durante un mes con lo cual se tendrá 20 muestras en total, las muestras fueron todas semejantes a excepción de una que cambió sus propiedades por tener más de tres meses almacenada la sustancia en un tanque hermético.

##### 2.1.2 *Métodos y técnicas*

###### 2.1.2.1 *Métodos*

El estudio propuesto de este proyecto tiene un carácter explicativo y experimental con el fin de obtener apropiadamente la metodología necesaria para el proyecto de diseño, selección y aplicación de todas las herramientas y componentes necesarios para la recuperación del percloroetileno mediante la destilación; en respuesta a las posibles interrogantes que se puedan presentar en el transcurso de la operación unitaria.

###### 2.1.2.1.1 *Método inductivo*

Este método parte desde lo simple a lo más complejo, a partir del muestreo, analizando las características del residuo y por destilación simple estableciendo las variables que intervienen en el proceso se puede proceder al cálculo de ingeniería, en el laboratorio se obtuvieron parámetros específicos necesarios para dimensionar (volumen, presiones, tiempo y temperatura), estos datos son el punto de partida para el dimensionamiento del equipo de recuperación del disolvente.

El mayor porcentaje de rendimiento de percloroetileno recuperado, comenzando a temperatura ambiente 20 °C, continuando hasta su punto de ebullición y posteriormente hasta llegar a la temperatura máxima 140 °C es del 48% respecto a la alimentación, la operación no cuenta con ningún tipo de reacción química con los límites de temperatura establecidos, debido a que solo ocurre cambio de fase se obtendrán las especificaciones de las variables así como también sus valores a través de los diferentes ensayos que se llevarán a cabo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias y en la industria inducalsa.

#### **2.1.2.1.2** *Método deductivo*

El dimensionamiento del equipo de recuperación del solvente se fundamenta en los principios de los Cálculos Básicos, Transferencia de Calor y Operaciones Unitarias que son importantes para los cálculos y la determinación de variables del proceso para obtener el sistema para recuperar el percloroetileno.

Realizar los cálculos de diseño en la instalación de inducalsa con los valores experimentales obtenidos en la destilación efectuada en el laboratorio, las muestras se enviaron a analizar en laboratorios acreditados, los resultados obtenidos se encuentran dentro de lo especificado por la industria para reutilizar el solvente.

#### **2.1.2.1.3** *Método descriptivo*

Describe el dimensionamiento del sistema para la recuperación del percloroetileno mediante la destilación en un plano desarrollado, para realizar los diferentes cálculos y dimensionamiento del equipo es necesaria la recopilación de datos los cuales son tomados de las diferentes técnicas y ensayos que se realizan anticipadamente para su cálculo, el equipo consta de un tanque de alimentación que se envía al plato de alimentación, un tanque de ebullición con dos lados cónicos superior e inferior para la salida del vapor y el residuo de cola respectivamente, en su interior cuatro resistencias de inmersión protegidas por acero negro para evitar el contacto directo de la sustancia con las resistencias, una columna de platos, un condensador, reflujo, un distribuidor de corriente y un recipiente para la recolección del solvente recuperado.

### **2.1.2.2** *Técnicas*

Son procedimientos que se emplean para obtener un resultado determinado, muy necesarias porque son la guía para organizar la investigación y están apegadas a la práctica de manera específica al realizar una acción, teniendo fundamento teórico para que un procedimiento sea único, reflexible y confiable al emplear un material o instrumento.

Se debe compara el percloroetileno recuperado del residuo con el puro, para realizar la comparación en el proceso de dimensionamiento se tomó como base la ficha de seguridad DIRSA que indica propiedades como la de la densidad, pH y viscosidad que se necesita para la verificación del solvente recuperado en este caso el percloroetileno, también se realizara una comparación mediante espectrometría IR.

Se utilizan técnicas para la recopilación de información como las siguientes:

- Observaciones de laboratorio

#### **2.1.2.2.1** *Análisis de laboratorio*

Las técnicas empleadas y los análisis se realizaron en el Laboratorio de Análisis Instrumental de la Facultad de Ciencias en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo que está acreditado y por tanto el resultado de IR es confiable, también en la propia industria inducalca se realizaron las comparaciones correspondientes a la ficha de seguridad DIRSA en el laboratorio de Inducalsa obteniendo resultados favorables de densidad y pH.



**2.1.2.2.2** *Determinación del destilado de la mezcla PERC – silicona*

**Cuadro 1-2:** Determinación de cantidad de destilado por destilación simple

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA	CALCULO
<p>Realizar la separación de uno o varios componentes de una mezcla líquida aprovechando la diferencia de puntos de ebullición suficientemente marcada (al menos 25 °C) y deben ser inferiores a 150 °C.</p> <p>Colocar el líquido a destilar en un balón, adicionar calor para producir la vaporización.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Balón de destilación con doble boca</li> <li>• Codo</li> <li>• Refrigerante</li> <li>• Soporte universal</li> <li>• Pinzas</li> <li>• Mangueras</li> <li>• Reverbero</li> <li>• Termómetro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Armar el equipo de destilación simple.</li> <li>• Colocar 200ml de la muestra en el balón.</li> <li>• Prender el reverbero y esperar hasta que empiece la ebullición de la solución.</li> <li>• Registrar los datos de temperatura a cada 10ml destilados.</li> <li>• Medir el destilado y comparar con el volumen inicial.</li> </ul>	<p>Volumen Recuperado</p> $V_r = V_i - V_f$ <p>Dónde:  <math>V_f</math>: volumen final  <math>V_i</math>: volumen inicial</p>

Fuente: BRITO, H. Técnica Guía Laboratorio Operaciones Unitarias. ESPOCH/2014

### 2.1.2.2.3 Requisitos para el destilado

**Cuadro 2-2:** Requisitos para el destilado percloroetileno

FUNDAMENTO	REQUISITOS	TÉCNICA	UNIDAD	MÍNIMO	MÁXIMO
El percloroetileno debe ser un líquido transparente, libre de partículas en suspensión, no tener sedimentos ni presentar separación de fases líquidas de componentes; deben cumplir correctamente la función de lavado de suelas.	Potencial Hidrogeno	Hoja de seguridad OXIQUM.S.A	pH	6,8	8,4
	Densidad (20°C)	Hoja de seguridad DIRSA, OXIQUM.S.A	Kg/m <sup>3</sup>	1621	1630
	Viscosidad	Hoja de seguridad DIRSA	cP	0,83	-
	Color	Hoja de seguridad DIRSA	Incoloro		
	Olor	DIRSA	Dulce semejante al del éter		

Fuente: Hoja de seguridad DIRSA –PERC, OXIQUM.S.A, 2015

#### 2.1.2.2.4 Determinación del pH

**Cuadro 3-2:** Potencial hidrogeno del destilado (percloroetileno)

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA
<p>Comprende la determinación del potencial de hidrogeno en un rango comprendido es aplicable a mezclas y disolventes que tengan un patrón de referencia para su comparación.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peachímetro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Colocar el líquido destilado en un tubo de ensayo.</li> <li>• Prender el peachímetro e introducir el electrodo en la solución buffer para calibrar el equipo.</li> <li>• Limpiar el electrodo, introducir al tubo de ensayo y obtener el valor para comparar.</li> </ul>
	<p style="text-align: center;"><b>SUSTANCIA</b></p>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Destilado (Percloroetileno)</li> </ul>	
	<p style="text-align: center;"><b>PREPARACIÓN DE LA MUESTRA</b></p> <p>El producto es cristalino con olor dulce se encontrara en recipientes esterilizados.</p>	

Fuente: FAUSTO, T. Técnica Guía Laboratorio Análisis Instrumental. ESPOCH/2014

### 2.1.2.2.5 Determinación de la densidad con picnómetro

**Cuadro 4-2:** Densidad del destilado (percloroetileno)

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA	CÁLCULOS
Comprende la determinación de la densidad en rango comprendido entre 1600 Kg/m <sup>3</sup> y 1630 Kg/m <sup>3</sup> , debido a la aplicación del percloroetileno en el lavado de suelas. Es aplicable a mezclas y disolventes que tengan un patrón de referencia para su comparación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Picnómetro de 10 mL</li> <li>Balanza analítica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prender la balanza y encerrar</li> <li>Pesar el picnómetro de 10 mL vacío en la balanza analítica.</li> <li>En el picnómetro colocar la muestra (destilado) hasta llenar a su borde.</li> <li>Introducir el capilar del picnómetro, el líquido debe llegar hasta su altura.</li> <li>Limpiar bien el picnómetro.</li> <li>Pesar el picnómetro con destilado y obtener datos.</li> </ul>	<p>La densidad de la muestra se determina:</p> $m = pm - pv$ <p>Dónde:</p> <p>m: Peso del destilado (g)</p> <p>pm: Peso picnómetro con muestra</p> <p>pv: Peso picnómetro vacío</p> $\rho = \frac{m}{v}$ <p>Dónde:</p> <p>v: Volumen muestra (10 mL)</p> <p>m: Peso del destilado (g)</p> <p><math>\rho</math>: densidad de destilado (g/mL)</p>
	<b>SUSTANCIA</b>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Destilado Percloroetileno</li> </ul>		
	<b>PREPARACIÓN DE LA MUESTRA</b>		
	Producto cristalino con olor dulce en recipientes esterilizados.		

Fuente: ANDRES. O. Técnica Guía Laboratorio Química Orgánica I. ESPOCH/2014

2.1.2.2.6 *Determinación de la densidad con probeta*

**Cuadro 5-2:** Densidad del destilado (percloroetileno)

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA	CÁLCULOS
<p>Comprende la determinación de la densidad en rango comprendido entre 1600 Kg/m<sup>3</sup> y 1630 Kg/m<sup>3</sup>, debido a la aplicación del percloroetileno en el lavado de suelas. Es aplicable a mezclas y disolventes que tengan un patrón de referencia para su comparación.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Probeta de 50 mL</li> <li>• Balanza analítica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prender la balanza y encerrar</li> <li>• Pesarse la probeta de 50mL vacía en la balanza analítica.</li> <li>• En la probeta colocar 10 mL de muestra (destilado).</li> <li>• Pesarse la probeta con el destilado y escribir los datos.</li> </ul>	<p><b><math>m = ppd - ppv</math></b>  Dónde:  m: Peso del destilado (g)  ppd: Peso probeta con muestra  ppv: Peso probeta vacía</p> <p>Densidad del destilado,  <math display="block">\rho = \frac{m}{v}</math> Dónde:  v: Volumen muestra (10 mL)  m: Peso del destilado (g)  ρ: densidad de destilado (g/mL)</p>
	<b>SUSTANCIA</b>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Destilado (Percloroetileno)</li> </ul>		
	<b>PREPARACIÓN DE LA MUESTRA</b>		
	<p>El producto es cristalino con olor dulce se encontrara en recipientes esterilizados.</p>		

Fuente: ANDRES. O. Técnica Guía Laboratorio Química Orgánica I. ESPOCH/2014

2.1.2.2.7 *Temperatura de ebullición del destilado*

**Cuadro 6-2:** Temperatura de ebullición a presión atmosférica del destilado

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA	CÁLCULOS
<p>Determina la temperatura de ebullición a presión atmosférica del destilado recuperado del residuo procedente del lavado de suelas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reverbero</li> <li>• Balón de ebullición de 500 mL</li> <li>• Termómetro de 360 °C</li> <li>• Codo</li> <li>• Refrigerante</li> <li>• Soportes universales</li> <li>• Pinzas universales</li> <li>• Erlenmeyer de 250mL</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Armar el equipo de destilación simple</li> <li>• Colocar 200 mL de PERC – puro en el balón de ebullición.</li> <li>• Prender el reverbero</li> <li>• Observar en el termómetro a que temperatura hierve el líquido.</li> <li>• Hacer lo mismo con el destilado y obtener los datos.</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><math>\Delta T_d = T_2 - T_1</math></p> <p>Dónde:            T<sub>2</sub>: Temperatura experimental líquido destilado en la punto de ebullición(°C)            T<sub>1</sub>: Temperatura teórica DIRSA, en el punto de ebullición (°C).            ΔTd: Diferencia de temperatura del líquido recuperado (°C).</p>
	<b>SUSTANCIA</b>		
	Destilado (Percloroetileno)		

Fuente: Datos de temperatura, Hoja de Seguridad DIRSA – PERC, 2015

**2.1.2.2.8** *Determinación del color en escala APHA*

**Cuadro 7-2:** Color del destilado

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA
<p>El método de ensayo para determinar el color en escala platino-cobalto en el solvente se aplica a sustancias con absorción ligera.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tubos Nessler con tapón de inmersión.</li> <li>• Gancho para sujetar los tubos</li> <li>• Mirilla para el patrón y la muestra</li> <li>• Lámpara</li> <li>• Disco de colores APHA</li> <li>• Control de la escala graduado para girar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visualmente el destilado es incoloro.</li> <li>• Determinar por duplicado.</li> <li>• Llenar los dos tubos uno con el destilado hasta la línea de enrase y el otro con el agua destilada.</li> <li>• Colocar el tapón y colgar en los ganchos.</li> <li>• Cerrar el instrumento, usar el disco de colores y prender la lámpara.</li> <li>• Buscar el color que asemeje a la muestra girando el disco y mirando la mirilla.</li> <li>• Ver número que corresponde círculo rojo en la parte inferior de la mirilla, unidad de color APHA.</li> <li>• En color superior al disco diluir hasta coincidir el color y el resultado será el número de diluciones por el número de lectura en la mirilla.</li> </ul>
	<p><b>SUSTANCIA</b></p>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Destilado</li> <li>• Agua destilada</li> </ul>	

Fuente: Hoja de seguridad DIRSA – PERC, 2015

2.1.2.2.9 Olor del destilado

**Cuadro 8-2:** Olor del destilado

<b>FUNDAMENTO</b>	<b>MATERIALES</b>	<b>TÉCNICA</b>
<p>El método de ensayo para determinar el olor del destilado es mediante la comparación de PERC – PURO y el líquido recuperado por medio de distinción organoléptica utilizando el sentido del olfato.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tubos de ensayo</li> <li>• Gradilla</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Colocar en un tubo de ensayo PERC – PURO</li> <li>• Colocar en otro tubo de ensayo liquido destilado</li> <li>• Colocar los tubos de ensayo separados en la gradilla.</li> <li>• Ubicar la gradilla en un lugar sin ventilación.</li> <li>• Oler rápidamente y percibir si los dos líquidos son de carácter dulce parecido al éter.</li> </ul>
	<b>SUSTANCIA</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PERC – PURO</li> <li>• Destilado</li> </ul>	

Fuente: Laboratorio de control de calidad inducalsa, 2015



**2.1.2.2.10** *Determinación del espectro IR del destilado*

**Cuadro 9-2:** Espectrometría al destilado

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA	OBJETIVO
<p>La espectrometría de infrarrojos de tipo adsorción que utiliza la región infrarroja del espectro electromagnético. Puede ser utilizada para identificar un compuesto de una mezcla determinada.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espectrofotómetro IR</li> <li>• Gotero</li> <li>• Líquido destilado</li> <li>• Blanco</li> <li>• Alcohol</li> <li>• Algodón</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prender el IR y el computador con su software de control.</li> <li>• Colocar la sustancia encerada y correr el programa.</li> <li>• Hacer lo mismo con el líquido recuperado.</li> <li>• Cerrar el equipo y verificar la información de los picos obtenidos para la comparación.</li> </ul>	<p>Obtener el patrón con una muestra pura de PERC y comparar con la del disolvente recuperado.</p>

Fuente: FAUSTO, T. Técnica Guía Laboratorio Análisis Instrumental. ESPOCH/2014

### 2.1.2.2.11 Determinación del enlace múltiple

**Cuadro 10-2:** Determinación del enlace múltiple en los carbonos adyacentes

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA	OBJETIVO
Mediante el uso del reactivo de Baeyer para identificar la presencia de enlaces múltiples sean dobles o triples en los carbonos adyacentes ocurriendo un cambio de coloración de purpura a marrón.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Tubos de ensayo</li><li>• Gradilla</li><li>• Pipeta</li><li>• Gotero</li><li>• Destilado</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Colocar en el tubo de ensayo una cantidad de destilado.</li><li>• Con un gotero añadir unas tres gotas de Permanganato de potasio.</li><li>• Agitar brevemente y observar si ocurre el cambio de coloración.</li></ul>	Observar si ocurre el cambio de coloración en el destilado al agregar el reactivo color purpura a marrón.

Fuente: ANDRES. O. Técnica Guía Laboratorio Química Orgánica I. ESPOCH/2014

**2.1.2.2.12** *Determinación de la viscosidad de la silicona*

**Cuadro 11-2:** Determinación de viscosidad en la silicona

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA
<p>Mediante el uso del viscosímetro se puede determinar la viscosidad de una sustancia con una determinada velocidad con un número de aguja específico y una tabla de conversión.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Viscosímetro</li> <li>• Vaso de precipitación de 250 mL</li> <li>• Regla de conversión</li> <li>• Silicona pura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Colocar 250 mL del fluido en un recipiente graduado con esta medida.</li> <li>• Colocar la aguja número 4 a 20 RPM; con una temperatura promedio del fluido entre 20 – 22 °C.</li> <li>• Colocar el recipiente debajo de la aguja y descender hasta la señal de la aguja.</li> <li>• Encender el equipo y esperar que la aguja del disco se estabilice.</li> <li>• Levantar la palanca que sujeta la señal de medida y apagar el motor de rotación.</li> <li>• Registrar el valor de la escala.</li> <li>• Multiplicar el valor obtenido por 100 y registrar en la hoja de especificaciones.</li> </ul>

Fuente: CARLOS. M., Método de ensayo 11, INDUCALSA/2014

## 2.2 Datos de diseño

### 2.2.1 Diagnóstico

La mezcla percloroetileno - silicona es el residuo obtenido por la actividad de lavado de suelas en inducalsa que después de que el solvente se satura de silicona es removido de la canastilla de lavado y se deposita en unos tanques donde se lo cierra herméticamente para luego ser entregados a una entidad que hace la disposición final a cambio de un valor económico de 0,90 ctvs., de dólar por cada kilogramo de residuo generado.

En el área de producción de suelas PU de la Industria Nacional de Calzado S.A se obtiene un promedio cada dos meses de 450 kilogramos de mezcla percloroetileno – silicona tomando en cuenta que mensualmente producen de manera promedio 30 000 pares de suelas de diferentes tallas y que todos los días laborables de la industria (Lunes a Viernes) la producción es diferente diariamente.

Ahora éste residuo será almacenado en tanques de acero y sellado herméticamente para luego ser sometido a la operación de destilación del equipo a diseñarse, el solvente recuperado tiene las mismas características que el original, la investigación denota el diseño de un sistema para recuperar el solvente mediante un equipo para purificarlo, al realizar pruebas de laboratorio con Operación Unitaria como la destilación simple se determinó las condiciones para el diseño del equipo y se estableció realizar la operación en tipo batch, el equipo es adecuado para las empresas, industrias y organizaciones que utilizan como solvente el percloroetileno ya que permite disminuir la cantidad de residuos que contaminan el ambiente y tener menores gastos en adquirir este disolvente.

### 2.2.2 Datos experimentales

**Tabla 5-2:** Caudal de alimentación

INDICADOR	PESO (g)	OPERACION	RESULTADO
P <sub>v</sub> 500ml	260	-	-
P <sub>v</sub> 500ml+ 100 mL muestra (PERC-SILICONA)	390,4	390,4 - 260	130,4
P <sub>v</sub> 500ml+ muestra (PERC destilado)	327,808	327,808 - 260	67,808
Entonces tenemos para la alimentación: 52% de PERC y 48% de residuos.			130,4 g=100% 67,808 g = 52%

Realizado por: ANDRADE W., Laboratorio Control de Calidad inducalsa, 2014

**Tabla 6-2:** Datos de destilación

VOLUMEN (mL)	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO (min)	VOLUMEN (mL)	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO (min)
5	110	7,29	27	110	12,25
6	110	7,52	28	110	12,42
8	110	8,10	29	110	13,06
10	110	8,22	30	111	13,18
12	110	8,42	31	111	13,32
14	110	8,58	32	111	13,49
15	110	9,00	33	111	14,23
17	110	9,32	34	111	14,45
18	110	9,49	35	111	15,15
19	110	10,00	36	112	15,46
20	110	10,13	37	112	16,19
21	110	10,37	38	116	16,51
22	110	11,02	39	120	17,39
23	110	11,28	40	121	18,31
24	110	11,39	41	124	20,27
25	110	11,97	42	126	22,11
26	110	12,09	43	127	23,57

Realizado por: ANDRADE. W., Instalaciones inducalsa 2014

**Tabla 7-2:** Datos de pH

MUESTRA	pH	MUESTRA	pH
01-DESTILADO	7,71	10-DESTILADO	6,97
02-DESTILADO	7,84	11-DESTILADO	7,71
03-DESTILADO	7,65	12-DESTILADO	7,83
04-DESTILADO	7,71	13-DESTILADO	7,69
05-DESTILADO	7,19	14-DESTILADO	7,76
06-DESTILADO	6,71	15-DESTILADO	7,71
07-DESTILADO	6,89	16-DESTILADO	7,73
D-MEZCLA(01:07)	8,21	17-DESTILADO	7,72
PERC-PURO	7,51	D-MEZCLA(14:17)	8,24
MEZCLA(PERC-SIL)	6,55	18-DESTILADO	7,71
08-DESTILADO	7,74	19-DESTILADO	7,65
09-DESTILADO	7,79	20-DESTILADO	7,82

Realizado por: ANDRADE. W., Instalaciones inducalsa 2014

**Tabla 8-2:** Datos de densidades

MUESTRA	(Kg/L)	(Kg/m3)	MUESTRA	(Kg/L)	(Kg/m3)
01-DESTILADO	1,705	1705	11-DESTILADO	1,700	1700
02-DESTILADO	1,624	1624	12-DESTILADO	1,702	1702
03-DESTILADO	1,577	1577	13-DESTILADO	1,707	1707
04-DESTILADO	1,610	1610	14-DESTILADO	1,699	1699
05-DESTILADO	1,608	1608	15-DESTILADO	1,707	1707
06-DESTILADO	1,755	1755	16-DESTILADO	1,707	1707
07-DESTILADO	1,596	1596	17-DESTILADO	1,706	1706
D-MEZCLA(01:07)	1,707	1707	D-MEZCLA(14:17)	1,707	1707
PERC-PURO	1,707	1707	W-MEZCLA(14:17)	1,040	1040
W-MEZCLA(01:07)	1,039	1039	MEZCLA(PERC-SIL)	1,304	1304
MEZCLA(PERC-SIL)	1,270	1270	18-DESTILADO	1,703	1703
08-DESTILADO	1,708	1708	19-DESTILADO	1,706	1706
09-DESTILADO	1,753	1753	20-DESTILADO	1,710	1710
10-DESTILADO	1,644	1644	SILICONA-PURA	1,045	1045

Realizado por: ANDRADE. W., Instalaciones inducalsa 2014

**Tabla 9-2:** Datos de equilibrio líquido - vapor

T(°C)	X <sub>A</sub>	Y <sub>A</sub>	T(°C)	X <sub>A</sub>	Y <sub>A</sub>
110	1	1	126	0,46	0,75
112	0,94	0,98	128	0,42	0,72
114	0,88	0,96	130	0,39	0,69
116	0,84	0,95	133	0,37	0,66
118	0,79	0,93	135	0,35	0,63
120	0,70	0,90	138	0,32	0,60
122	0,62	0,86			
124	0,55	0,82	250	0	0

Realizado por: ANDRADE. W., Instalaciones inducalsa, 2014

**Tabla 10-2:** Componentes y flujo de alimentación

COMPONENTES	UNIDADES
A: (PERCLORETIENO)	165,83 Kg/Kmol
B: (SILICONA)	159,325 Kg/Kmol
MT: FLUJO DE MEZCLA	45,73 Kg/h

Realizado por: ANDRADE W., Laboratorio de control de calidad, inducalsa 2015

**Tabla 11-2:** Tiempos de residencia

Volumen (L)	Tiempo de destilación (min)
30	60
60	120
90	180
120	240

Realizado por: ANDRADE W., Laboratorio Control de Calidad inducalsa, 2014

### 2.2.3 Datos adicionales

**Tabla 12-2:** Datos de densidad Y pH

<b>DIRSA</b>	<b>OXIQUIM.S.A</b>
DENSIDAD (g/mL): 1,62	pH: 6,4 – 8,4

Realizado por: ANDRADE W., Laboratorio Control de Calidad inducalsa, 2014

Fuente: Hoja de seguridad DIRSA, OXIQUIM.S.A, 2015

**Tabla 13-2:** Datos sobre componentes de la mezcla

<b>PARAMETRO</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>PERC</b>	<b>SILICONA</b>
Cp	Kcal/Kg °C	0,205	1,34
$\lambda$	Kcal/Kg	50,10	123,15
Tb	°C	121	250
$\mu$	cP	0,39	664
$\rho$	Kg/m <sup>3</sup>	1621	1045

Realizado por: ANDRADE W., Laboratorio Control de Calidad inducalsa, 2014

Fuente: Hoja de seguridad DIRSA, OXIQUIM.S.A, 2015

## CAPITULO III

### 3 CÁLCULOS Y RESULTADOS

#### 3.1 Cálculos

##### 3.1.1 Cálculo del tanque de ebullición

###### 3.1.1.1 Volumen de alimentación

Datos:

RG= 225 Kg/mes

$\rho_{RG}$ = 1,304 Kg/L

batch= 2

De la Ecuación 19 se tiene:

$$V_F = \frac{225}{1,304}$$

$$V_F = \frac{172,54}{2}$$

$$V_F = 86,27 \text{ L}$$

###### 3.1.1.2 Volumen total del tanque de ebullición

Datos:

$V_F$ = 86,27 L: 75%

$$V_{T_{te}} = \frac{86,27 \text{ L} * 100\%}{75\%}$$

Ecuación 78

$$V_{T_{te}} = 115,026 \text{ L}$$

###### 3.1.1.3 Volumen del cono inferior

Datos:

r=30 cm=0,30 m

h= 5 cm=0,05 m

De la Ecuación 21 se tiene:

$$V_{ci} = \frac{1}{3} * \pi * (0,30)^2 * 0,05$$

$$V_{ci} = 0,00471 \text{ m}^3 = 4,71 \text{ L}$$



### 3.1.1.4 Volumen del cilindro

Datos:

$$\varnothing = 60\text{cm} = 0,60\text{ m}$$

$$h = 36\text{ cm} = 0,36\text{ m}$$

$$V_F = 86,27\text{ L}$$

De la Ecuación 23 se tiene:

$$V_c = \frac{\pi * (0,60)^2 * 0,36}{4}$$

$$V_c = 0,10179\text{m}^3$$

$$V_c = 101,79\text{ L}$$

### 3.1.1.5 Volumen de las resistencias

Datos:

$$\varnothing = 10\text{cm} = 0,10\text{ m}$$

$$h = 20\text{ cm} = 0,20\text{ m}$$

Cantidad de resistencias = 4

De la Ecuación 23 se tiene:

$$V_c = \frac{\pi * (0,10)^2 * 0,20}{4}$$

$$V_c = 0,00157\text{ m}^3 = 1,57\text{ L}$$

$$V_c = 1,57 * 4$$

$$V_c = 6,28\text{ L}$$

### 3.1.1.6 Volumen del cilindro con las resistencias en su interior

$$V_{cr} = V_c - V_r$$

Ecuación 79

$$V_{cr} = 101,79 - 6,28$$

$$V_{cr} = 95,51\text{ L}$$

### 3.1.1.7 Volumen del cono inferior y cilindro con las resistencias en su interior

Datos:

$$V_{T_{te}} = 115,026\text{ L}$$

$$V_F = 86,27\text{ L} = 75\%$$

$$V_{cicr} = V_{ci} + V_{cr}$$

Ecuación 80

$$V_{cicr} = 4,71 + 95,51$$

$$V_{cicr} = 100,21\text{ L}$$

### 3.1.1.8 Volumen del cono superior

De la Ecuación 79 se tiene:

$$\begin{aligned}V_{cs} &= VT_{te} - V_{cicr} \\V_{cs} &= 115,026 - 100,21 \\V_{cs} &= 14,82 \text{ L}\end{aligned}$$

### 3.1.1.9 Altura del cono superior

Datos:

$$r = 30 \text{ m} = 0,30 \text{ m}$$

$$V_{cs} = 14,82 \text{ L} = 0,01482 \text{ m}^3$$

De la ecuación 22 se tiene:

$$\begin{aligned}h &= \frac{3 * 0,01482}{\pi * (0,30)^2} \\h &= 0,16 \text{ m}\end{aligned}$$

### 3.1.1.10 Altura total del tanque de ebullición

$$\begin{aligned}h_{\text{total del tanque}} &= h_{\text{cono inferior}} + h_{\text{cilindro}} + h_{\text{cono superior}} && \text{Ecuación 81} \\h_{\text{tanque}} &= 5 + 36 + 16 \\h_{\text{tanque}} &= 57 \text{ cm} \\h_{\text{tanque}} &= 0,57 \text{ m}\end{aligned}$$

### 3.1.1.11 Altura de alimentación en el tanque de ebullición

Datos:

$$V_F = 86,27 \text{ L}$$

$$V_{ci} = 0,00471 \text{ m}^3 = 4,71 \text{ L}$$

$$V_r = 6,28 \text{ L}$$

De la Ecuación 79 se tiene:

$$\begin{aligned}V_{fci} &= V_F - V_{ci} \\V_{fci} &= 86,27 - 4,71 \\V_{fci} &= 81,56 \text{ L}\end{aligned}$$

De la Ecuación 80 se tiene:

$$V_{hf} = V_F + V_r$$

$$V_{hf} = 86,27 + 6,28$$

$$V_{hf} = 92,55 \text{ L}$$

Datos:

$$\varnothing = 60 \text{ cm} = 0,60 \text{ m}$$

$$V_{hf} = 92,55 \text{ L} = 0,09255 \text{ m}^3$$

De la Ecuación 24 se tiene:

$$h_{fte} = \frac{4 * 0,09255}{\pi * (0,60)^2}$$

$$h_{fte} = 0,33 \text{ m}$$

Las cuatro resistencias se colocan en el cilindro del tanque de ebullición.

### 3.1.2 Cálculo para el tanque de alimentación

#### 3.1.2.1 Volumen total del tanque de alimentación

Dato:

$$V_F = 86,27 \text{ L} = 90\%$$

De la ecuación 78 se tiene:

$$V_{T_{ta}} = \frac{86,27 \text{ L} * 100\%}{90\%}$$

$$V_{T_{ta}} = 95,85 \text{ L}$$

#### 3.1.2.2 Volumen del cono inferior y superior

Datos:

$$r = 30 \text{ cm} = 0,30 \text{ m}$$

$$h = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$$

De la Ecuación 21 se tiene:

$$V_{ci} = \frac{1}{3} * \pi * (0,30)^2 * 0,05$$

$$V_{ci} = 0,00471 \text{ m}^3 = 4,71 \text{ L}$$

$$V_{cs} = 4,71 \text{ L}$$

$$V_{cis} = 9,42 \text{ L}$$

#### 3.1.2.3 Volumen del cilindro

De la Ecuación 79 se tiene:

$$\begin{aligned}V_c &= V_{T_{ta}} - V_{cis} \\V_c &= 95,85 - 9,42 \\V_c &= 86,43 \text{ L}\end{aligned}$$

### 3.1.2.4 *Altura del cilindro*

Datos:

$$\varnothing = 60\text{cm} = 0,60 \text{ m}$$

$$V_c = 86,43 \text{ L} = 0,08643$$

De la Ecuación 24 se tiene:

$$\begin{aligned}h_{fte} &= \frac{4 * 0,08643}{\pi * (0,60)^2} \\h_{fte} &= 0,31 \text{ m}\end{aligned}$$

### 3.1.2.5 *Altura total del tanque de alimentación*

De la Ecuación 81 se tiene:

$$\begin{aligned}h_{\text{total del tanque alimentación}} &= h_{\text{cono inferior}} + h_{\text{cilindro}} + h_{\text{cono superior}} \\h_{\text{total del tanque alimentación}} &= 5 + 31 + 5 \\h_{\text{total del tanque alimentación}} &= 41 \text{ cm} \\h_{\text{total del tanque alimentación}} &= 0,41 \text{ m}\end{aligned}$$

### 3.1.2.6 *Altura de llenado en el tanque de alimentación*

Dato:

$$V_F = 86,27 \text{ L} = 0,08627 \text{ m}^3$$

$$\varnothing = 0,60 \text{ m}$$

De la Ecuación 24 se tiene.

$$\begin{aligned}h_{ftf} &= \frac{4 * 0,08627}{\pi * (0,60)^2} \\h_{ftf} &= 0,31 \text{ m}\end{aligned}$$

## 3.1.3 *Cálculo para la columna de destilación*

### 3.1.3.1 *Cálculo de la capacidad calorífica promedio*

Utilizando los datos de la Tabla 13-2 con la Ecuación 25 se tiene:

$$(\overline{Cp}) = (0,52 * 0,205) + (0,48 * 1,34)$$

$$(\overline{Cp}) = 0,75 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } C^{\circ}}$$

### 3.1.3.2 Cálculo del calor latente medio

Utilizando los datos de la Tabla 13-2 con la Ecuación 26 se tiene:

$$\lambda F = (0,52 * 50,1) + (0,48 * 123,15)$$

$$\lambda F = 85,16 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

### 3.1.3.3 Cálculo del parámetro $f$ de alimentación

De la Ecuación 27 se tiene:

$$f = \frac{0,75(108 - 20)}{85,16}$$

$$f = -0,775$$

### 3.1.3.4 Cálculo de la pendiente

De la Ecuación 28 se tiene:

$$m = \frac{-(1 - (-0,775))}{-0,775}$$

$$m = 2,29$$

De la Ecuación 29 se tiene:

$$\Phi = \arctg(2,29) = 66,4$$

### 3.1.3.5 Gráfica del sistema

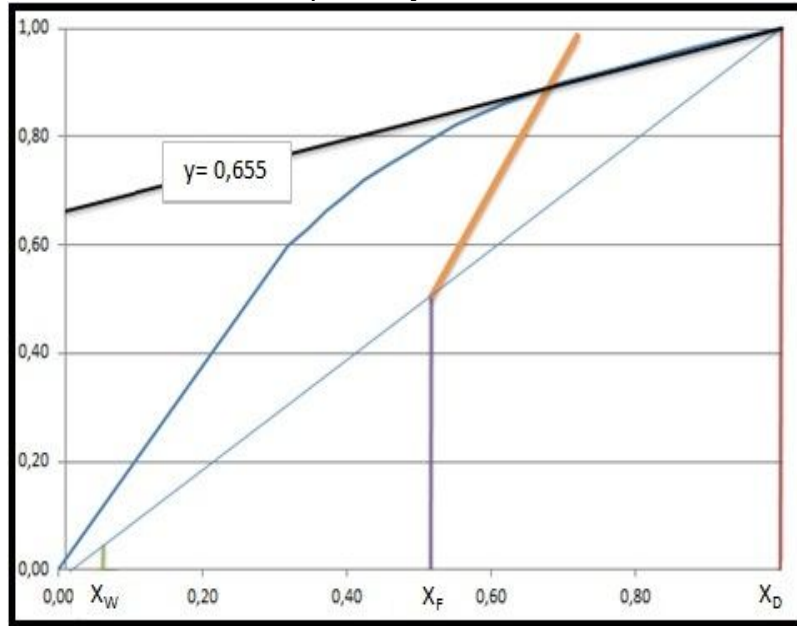
#### 3.1.3.5.1 Línea de 45°

### 3.1.3.5.2 Curva de equilibrio vapor – líquido

### 3.1.3.5.3 Líneas de referencia en fracción de $x_F$ , $x_D$ y $x_W$ .

### 3.1.3.5.4 Recta de alimentación

**Gráfico 3-3:** Curva de equilibrio y fracciones



Realizado por: ANDRADE W., Área PU, inducalsa 2015

### 3.1.3.6 Cálculo de la relación de reflujo mínimo

De la Ecuación 31 y la gráfica 3 se tiene:

$$\frac{x_D}{R_D \text{ min} + 1} = 0,655$$
$$x_D = 0,655(R_D \text{ min} + 1)$$
$$1 = 0,655(R_D \text{ min} + 1)$$
$$R_D \text{ min} = 0,52$$

Con el valor de 0,52 ubicado en el eje (y) trazar la recta de rectificación desde la intersección de la línea de 45° con la fracción de destilado  $x_D$ .

### 3.1.3.7 Cálculo de la relación de reflujo total

De la Ecuación 32 se tiene:

$$RT = 1.5 * 0,52$$

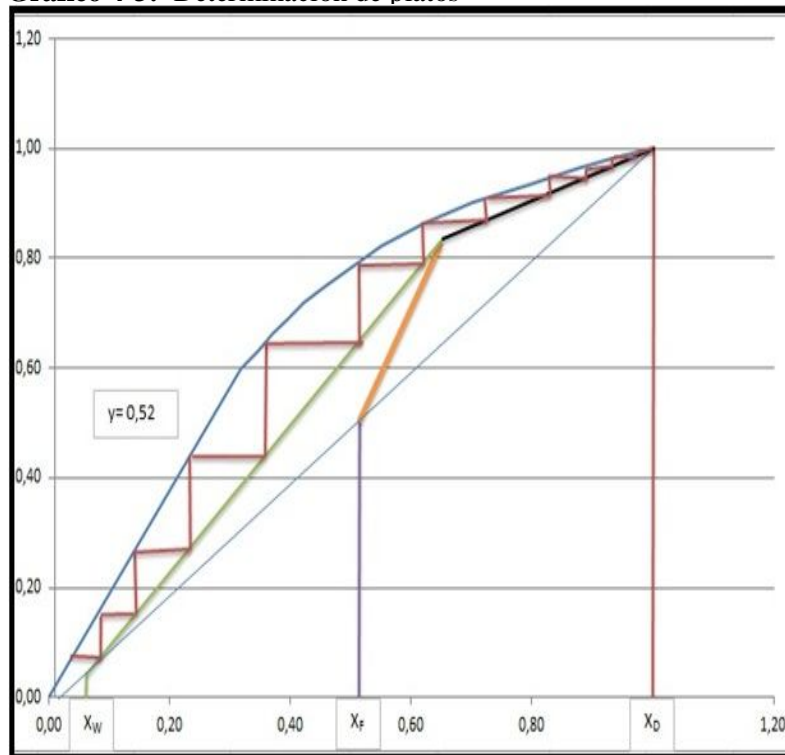
$$RT = 0,78$$

### 3.1.3.8 Recta de agotamiento

La recta de agotamiento se obtiene uniendo los puntos de intersección de la fracción de residuo  $X_W$  con la línea de  $45^\circ$  y el punto de intersección de la línea de alimentación con la línea de rectificación.

### 3.1.3.9 Trazado del número de platos teóricos

**Gráfico 4-3:** Determinación de platos



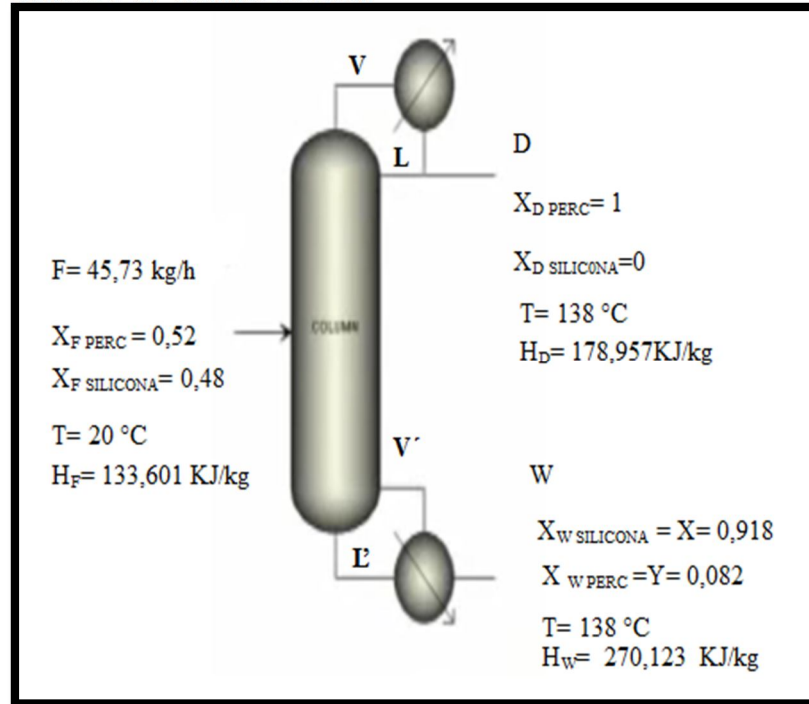
Realizado por: ANDRADE W., Área PU, inducalsa 2015

### 3.1.3.10 Cálculo del flujo molar de alimentación

$$F = 86,27L * \frac{1000ml}{1L} * \frac{1.304g}{ml} * \frac{1kg}{1000g} = \frac{112,49kg}{2,46h} = 45,73 \frac{kg}{h}$$

### 3.1.3.11 Balance de masa

**Gráfico 5-3:** Balance de masa



Realizado por: ANDRADE W., Área PU, inducalsa 2015

De la Ecuación 7 se tiene:

$$W = 86,27 - D$$

### 3.1.3.12 Balance de masa parcial

De la Ecuación 8 se tiene:

$$(86,27)(0,52) = D(1) + W(0,082)$$

$$44,86 = D + 0,082(86,27 - D)$$

$$44,86 - 7,07 = D - 0,082D$$

$$37,79 = 0,918D$$

$$D = \mathbf{41,16 \text{ L}}$$

$$W = 86,27 - 41,16$$

$$W = \mathbf{45,11 \text{ L}}$$



### 3.1.3.13 Cálculo de la temperatura promedio de la columna

De la Ecuación 34, 35 y 36 se tienen:

**Tabla 14-3:** Temperaturas de la mezcla

N	X(%)	MEDIA	T (°C)
1	5 - 40	ARITMETICA	134
2	40 - 52	GEOMETRICA	124,98
3	52 - 85	ARITMETICA	118
4	85 - 99,5	GEOMETRICA	111,98
$T = \sum Ti/n$			122,24

Realizado por: ANDRADE W., Área PU, inducalsa 2015

$$\text{MEDIA ARITMETICA} = \frac{130 + 133 + 135 + 138}{4} = 134$$

$$\text{MEDIA GEOMETRICA} = (128 * 126 * 124 * 122)^{\frac{1}{4}} = 124,98$$

$$\text{MEDIA ARITMETICA} = \frac{120 + 118 + 116}{3} = 118$$

$$\text{MEDIA GEOMETRICA} = (114 * 112 * 110)^{\frac{1}{3}} = 111,98$$

$$T = \frac{134 + 124,98 + 118 + 111,98}{4} = 122,24$$

### 3.1.3.14 Cálculo de la volatilidad relativa ( $\alpha$ ) y viscosidad ( $\mu$ )

#### 3.1.3.14.1 Cálculo de la volatilidad relativa ( $\alpha$ )

Interpolando con la temperatura media de 122,24 con los datos de la Tabla 8-2 se obtiene:

**Tabla 15-3:** Temperaturas y fracciones

T(°C)	X <sub>A</sub>	y <sub>A</sub>
122	0,62	0,86
124	0,55	0,82
122,24	0,61	0,85

Realizado por: ANDRADE W., Área PU, inducalsa 2015

$$\frac{124 - 122}{0,55 - 0,62} = \frac{122,24 - 122}{x - 0,62}$$

$$-28,57(x - 0,62) = 0,24$$

$$-28,57x + 17,71 = 0,24$$

$$-28,57x = -17,47$$

$$x = 0,61$$

$$\frac{124 - 122}{0,82 - 0,86} = \frac{122,24 - 122}{y - 0,86}$$

$$-50(y - 0,86) = 0,24$$

$$-50y + 43 = 0,24$$

$$-50y = -42,76$$

$$y = 0,85$$

De la Ecuación 37 se tiene:

$$\alpha = \frac{y(1-x)}{x(1-y)}$$

$$\alpha = \frac{0,85(1-0,61)}{0,61(1-0,85)}$$

$$\alpha = 3,6$$

### 3.1.3.14.2 Cálculo de la fluidez

De la Ecuación 38 se tiene:

$$\emptyset = \frac{1}{\mu \text{ PERC}} * Y + \frac{1}{\mu \text{ SIL}} * X$$

$$\emptyset = \frac{1}{0,39} * 0,85 + \frac{1}{664} * 0,61$$

$$\emptyset = 2,18$$

### 3.1.3.14.3 Cálculo de la viscosidad ( $\mu$ )

De la Ecuación 40 se tiene:

$$\mu = \frac{1}{2,18} = 0,45$$

$$\alpha\mu = 3,6 * 0,45 = 1,6$$

### 3.1.3.15 Cálculo de los platos reales

Dato:

Anexo J, I;  $E_0 = 0,45$

De la Ecuación 42 se tiene:

$$N_R = \frac{11}{0,45}$$

$$N_R = 24$$

### 3.1.3.16 Cálculo del plato de alimentación

De la Ecuación 43 se tiene:

$$P \text{ ALIMENTACION} = \frac{2,18}{0,45} = 4,84 = 5 \pm 2 \text{ platos}$$

### 3.1.3.17 Cálculo del diámetro

#### 3.1.3.17.1 Zona de rectificación

##### 3.1.3.17.1.1 Cálculo de la masa molecular media

Dato:

$X_D = 1$

De la Ecuación 44 se tiene:

$$M = (1 \cdot 165,83) + (0 \cdot 159,325)$$

$$M = 165,83 \text{ Kg/Kmol}$$

##### 3.1.3.17.1.2 Cálculo del caudal de vapor

Dato:

$D = 21,82 \text{ Kg/h}$

De la Ecuación 45 se tiene:

$$V = 21,82(1 + 0,78)$$

$$V = 38,84 \text{ Kg/h}$$

##### 3.1.3.17.1.3 Cálculo de la densidad de vapor

Dato:

$z = 0,804$

$$\rho_v = \frac{MP}{ZRT}$$

Ecuación 82

$$\rho_v = \frac{165,83 \cdot 0,71}{0,804 \cdot 0,082 \cdot 293}$$

$$\rho_v = 6 \text{ Kg/m}^3$$

#### 3.1.3.17.1.4 Cálculo de flujo del gas

Dato:

Anexo J, II; C= 40

De la Ecuación 46 se tiene:

$$G = 40[6(1621 - 6)]^{\frac{1}{2}}$$

$$G = 3937,51 \frac{\text{Kg}}{\text{hm}^2}$$

#### 3.1.3.17.1.5 Cálculo del área en la zona de rectificación

De la Ecuación 47 se tiene:

$$A = \frac{38,84}{3937,51}$$

$$A = 0,009864 \text{ m}^2$$

#### 3.1.3.17.1.6 Cálculo del diámetro de la columna en la zona de rectificación

De la Ecuación 48 se tiene:

$$\emptyset = \sqrt{\frac{4 * 0,009864}{\pi}}$$

$$\emptyset = 0,1120 \text{ m}$$

### 3.1.3.17.2 Zona de agotamiento

#### 3.1.3.17.2.1 Cálculo de la masa molecular media

Dato:

$X_w = 0,082$

De la Ecuación 44 se tiene:

$$M = (0,082 \cdot 165,83) + (0,918 \cdot 159,325)$$

$$M = 159,86 \frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}}$$

### 3.1.3.17.2.2 Cálculo del caudal de vapor medio

De la Ecuación 49 se tiene:

$$\nabla = 38,84 - (-0,775 * 45,73)$$

$$\nabla = 74,28 \text{ Kg/h}$$

### 3.1.3.17.2.3 Cálculo de la densidad de vapor

De la Ecuación 82 se tiene:

$$\rho_v = \frac{159,86 * 0,71}{0,804 * 0,082 * 293}$$

$$\rho_v = 5,87 \text{ Kg/m}^3$$

### 3.1.3.17.2.4 Cálculo de flujo del gas

Dato:

Anexo J, II; C=40

De la Ecuación 46 se tiene:

$$G = 40[5,87(1621 - 5,87)]^{\frac{1}{2}}$$

$$G = 3894,77 \frac{\text{Kg}}{\text{hm}^2}$$

### 3.1.3.17.2.5 Cálculo del área en la zona de agotamiento

De la Ecuación 47 se tiene:

$$A = \frac{74,28}{3894,77}$$

$$A = 0,01907 \text{ m}^2$$

### 3.1.3.17.2.6 Cálculo del diámetro de la columna en la zona de agotamiento

De la Ecuación 48 se tiene:

$$\phi = \sqrt{\frac{4 * 0,01907}{\pi}}$$

$$\phi = 0,1558 \text{ m}$$

### 3.1.3.18 Cálculo del diámetro promedio

De la Ecuación 50 se tiene:

$$\phi = \frac{0,1120 + 0,1558}{2}$$

$$\phi = 0,13 \text{ m}$$

### 3.1.3.19 Cálculo de la longitud

De la Ecuación 51 se tiene:

$$L = (24 - 1)0,10 + 1,5 * 0,10 + 2 * 0,10$$

$$L = 2,3 + 0,15 + 0,2$$

$$L = 2,65 \text{ m}$$

### 3.1.3.20 Longitud de la columna y diámetro de platos

Datos:

$$N_R = 12$$

$$\phi = 0,26 \text{ m}$$

De la Ecuación 51 se tiene:

$$L = (12 - 1)0,10 + 1,5 * 0,10 + 2 * 0,10$$

$$L = 1,1 + 0,15 + 0,2$$

$$L = 1,45 \text{ m}$$

## 3.1.4 Cálculo de la dinámica de los platos

### 3.1.4.1 Cálculo de parámetro de flujo líquido – vapor

Datos:

$$F=L= 45,73 \text{ Kg/h}$$

$$V= 38,84 \text{ Kg/h}$$

De la Ecuación 52 se tiene:

$$F_{IV} = \frac{45,73}{38,84} * \left( \frac{6}{1621} \right)^{0,5}$$

$$F_{IV} = 0,072$$

### 3.1.4.2 Determinación del factor de capacidad

Datos:

$\emptyset = 0,26$  m;  $0,305$  m

$d = 0,10$  m

$F_{IV} = 0,072$

Anexo J, III;  $C_{sb,graf} = 0,058$

De la Ecuación 53 se tiene:

$$C_{sb.inundación} = 0,058 * \left( \frac{0,025}{20} \right)^{0,2}$$

$$C_{sb.inundación} = 0,015$$

### 3.1.4.3 Determinación del porcentaje de inundación

De la Ecuación 54 se tiene:

$$Un_{inundación} = \frac{0,015}{\left( \frac{6}{1621-6} \right)^{0,5}}$$

$$Un_{inundación} = 0,25 * 100$$

$$Un_{inundación} = 25 \%$$

### 3.1.4.4 Cálculo de eficiencia

De la Ecuación 55 se tiene:

$$E = \frac{11}{12}$$

$$E = 0,92$$

$$E = 92 \%$$

### 3.1.4.5 Cálculo de eficiencia húmeda de la columna; por el arrastre fraccional

Datos:

$Un_{inundación} = 25\%$

$F_{IV} = 0,072$

Anexo J, IV;  $\varphi = 0,0038$

De la Ecuación 56 se tiene:

$$E_H = \frac{0,7}{1 + \left(\frac{0,7 * 0,0038}{1 - 0,0038}\right)}$$

$$E_H = 0,70$$

$$E_H = 70 \%$$

### 3.1.4.6 Cálculo del diámetro de las gotas formadas en el interior de la torre

De la Ecuación 57 se tiene:

$$dT = \sqrt{\frac{0,025}{(1621 - 6) * 9,81}}$$

$$dT = \sqrt{\frac{0,025}{15843,15}}$$

$$dT = 0,00126 \text{ m}$$

$$dT = 1,26 \text{ mm}$$

Diámetro de orificio de platos= 3 mm

Numero de perforaciones= 39

Distancia entre centro de diámetro= 12,5 mm

Figura = Cuadrada

### 3.1.5 Cálculos del condensador

#### 3.1.5.1 Cálculo del calor a quitar del vapor de PERC para que condense

##### 3.1.5.1.1 Calor latente

Datos:

$m^*_{\text{Destilado}} = 21,82 \text{ Kg/h}$

$h_{fg \text{ PERC Destilado}} = 178,957 \text{ KJ/Kg}$

De la Ecuación 58 se tiene:

$$Q_L = 21,82 * 178,957$$

$$Q_L = 3904 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$



### 3.1.5.1.2 Calor sensible

Datos:

$$C_p_{\text{PERC}} = 0,205 \text{ KJ/Kg.}^\circ\text{C}$$

$$T_1 = 138^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 30^\circ\text{C}$$

De la Ecuación 59 se tiene:

$$Q_s = 21,82 * 0,205 * (138 - 30)$$

$$Q_s = 483,09 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$

### 3.1.5.1.3 Calor total correspondiente al calor extraído por el condensador

De la Ecuación 60 se tiene:

$$Q_T = 3904,84 + 483,09$$

$$Q_T = Q_{\text{CONDENSADOR}} = 4387,93 \text{ KJ/h}$$

### 3.1.5.2 Cálculo del caudal másico de agua requerida

$$Q_{\text{PERDIDO (PERC)}} = Q_{\text{GANADO (AGUA)}}$$

Ecuación 84

De la Ecuación 59 se tiene:

$$4387,93 = m_{\text{agua}} * C_p * \Delta T$$

$$4387,93 = m_{\text{agua}} * 4,186 * (30 - 12)$$

$$m_{\text{agua}} = 58,24 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

$$m_{\text{agua}} = 58,24 * \frac{1}{3600} * 1 = 0,0162 \text{ Kg}$$

### 3.1.5.3 Volumen de agua ocupado en el condensador

Datos:

$$m_{\text{agua}} = 0,0162 \text{ kg}$$

$$\rho_{\text{agua}} = 1 \text{ Kg/m}^3$$

De la Ecuación 18 se tiene:

$$V = \frac{0,0162}{1}$$

$$V = 0,0162 \text{ m}^3$$

$$V = 16,2 \text{ L}$$

### 3.1.5.4 Volumen ocupado por el serpentín

Datos:

Tubo de cobre ½ pulgada

$\varnothing = 0,01587$  m

$h = 2$  m

De la Ecuación 23 se tiene:

$$V_{\text{serpentín}} = \frac{\pi * (0,01587)^2 * 2}{4}$$

$$V_{\text{serpentín}} = 0,0003956 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{serpentín}} = 0,396 \text{ L}$$

### 3.1.5.5 Volumen de la cámara de condensación

De la Ecuación 80 se tiene:

$$V_{\text{Condensador}} = V_{\text{cilindro}} + V_{\text{serpentín}}$$

$$V_{\text{Condensador}} = 16,2 + 0,396$$

$$V_{\text{Condensador}} = 16,596 \text{ L}$$

$$V_{\text{Condensador}} = 0,016596 \text{ m}^3$$

### 3.1.5.6 Altura del cilindro

Datos:

$\varnothing = 0,22$  m

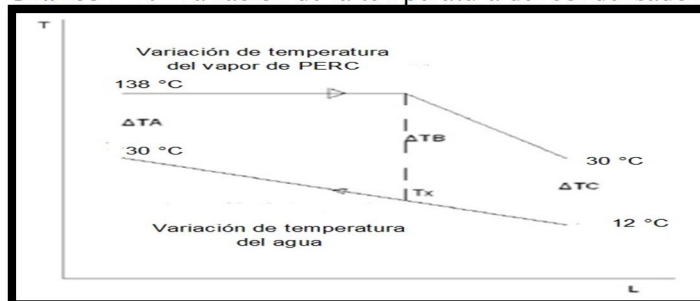
De la Ecuación 24 se tiene:

$$h = \frac{0,016596 * 4}{4 * (0,22)^2}$$

$$h = 0,44 \text{ m}$$

### 3.1.5.7 Determinación de la LMTD

**Gráfico 6-3:** Variación de la temperatura del condensador



Realizado por: ANDRADE. W., Área PU, inducalsa, 2015

Temperaturas del fluido frío (agua)

$$T_{ci} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{co} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperaturas del fluido caliente, vapor (PERC)

$$T_{hi} = 138 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{ho} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

### 3.1.5.7.1 Cálculo de la temperatura ( $T_x$ )

De la Ecuación 84 se tiene:

$$Q_{\text{PERDIDO (PERC)}} = Q_{\text{GANADO (AGUA)}}$$

De la Ecuación 59 se tiene:

$$4387,93 = m_{\text{agua}} * C_p * \Delta T$$

$$4387,93 = 58,24 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} * 4,186 * (30 - T_x)$$

$$4387,93 = 243,79 * (30 - T_x)$$

$$17,99 = 30 - T_x$$

$$T_x = 30 - 17,99$$

$$T_x = 12,01 \text{ }^\circ\text{C}$$

### 3.1.5.7.2 Cálculo de la LMTD para la condensación

De la Ecuación 61 se tiene:

$$\Delta T_A = 138 - 30$$

$$\Delta T_A = 108 \text{ }^\circ\text{C}$$

De la Ecuación 62 se tiene:

$$\Delta T_B = 30 - 12,01$$

$$\Delta T_B = 17,99 \text{ }^\circ\text{C}$$

De la Ecuación 64 se tiene:

$$LMTD_c = \frac{108 - 17,99}{\ln\left(\frac{108}{17,99}\right)}$$

$$LMTD_c = 50,22 \text{ }^\circ\text{C}$$

### 3.1.5.7.3 Cálculo de la LMTD para el enfriamiento

De la Ecuación 63 se tiene:

$$\Delta TC = 30 - 12$$

$$\Delta TC = 18 \text{ } ^\circ\text{C}$$

De la Ecuación 65 se tiene:

$$LMTD_e = \frac{17,99 - 18}{\ln \frac{17,99}{18}}$$

$$LMTD_e = 18 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### 3.1.6 Cálculo del tanque de almacenamiento

#### 3.1.6.1 Volumen total del tanque de almacenamiento

Se obtendrá como valor máximo  $V_{\text{destilado}} = 164,64 \text{ L} = 0,16464 \text{ m}^3$ , esto representa el 90% de lleno en el tanque de almacenamiento.

De la Ecuación 78 se tiene:

$$VT_{\text{ta}} = \frac{164,64 \text{ L} * 100\%}{90\%} = 181,89 \text{ L}$$

#### 3.1.6.2 Volumen del cono inferior y superior

Datos:

$$r = 30 \text{ cm} = 0,30 \text{ m}$$

$$h = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$$

De la Ecuación 21 se tiene:

$$V_{\text{ci}} = \frac{1}{3} * \pi * (0,30)^2 * 0,05$$

$$V_{\text{ci}} = 0,00471 \text{ m}^3 = 4,71 \text{ L}$$

$$V_{\text{cs}} = 4,71 \text{ L}$$

$$V_{\text{cis}} = 9,42 \text{ L}$$

#### 3.1.6.3 Volumen del cilindro

De la Ecuación 79 se tiene:

$$V_c = VT_{ta} - V_{cis}$$

$$V_c = 181,89 - 9,42$$

$$V_c = 172,47 \text{ L}$$

### 3.1.6.4 *Altura del cilindro del tanque de almacenamiento*

Dato:

$$V_c = 172,47 \text{ L} = 0,17247 \text{ m}^3$$

De la Ecuación 24 se tiene:

$$h = \frac{4 * 0,17247}{\pi * (0,60)^2}$$

$$h = 0,61 \text{ m}$$

### 3.1.6.5 *Altura total del tanque de almacenamiento*

De la Ecuación 81 se tiene:

$$h_{\text{total del tanque almacenamiento}} = 5 + 61 + 5$$

$$h_{\text{total del tanque almacenamiento}} = 71 \text{ cm}$$

$$h_{\text{total del tanque almacenamiento}} = 0,71 \text{ m}$$

### 3.1.6.6 *Altura de llenado en el tanque de almacenamiento*

Dato:

$$V_F = 164,64 \text{ L} = 0,16464 \text{ m}^3$$

$$r = 0,30 \text{ m}$$

De la Ecuación 24 se tiene:

$$h_{\text{tal}} = \frac{4 * 0,16464}{\pi * (0,60)^2}$$

$$h_{\text{tal}} = 0,58 \text{ m}$$

### 3.1.7 *Balace de energía*

De la Ecuación 66 se tiene:

$$Q_R + H_F = Q_C + \cancel{H_D} + H_W + Q_P$$

### 3.1.7.1 Calor del condensador

De la Ecuación 83 se tiene:  $Q_{\text{CONDENSADOR}}=4387,93 \text{ KJ/h}$

### 3.1.7.2 Cálculo del calor requerido para calentar la mezcla

De la Ecuación 59 se tiene:

$$Q_{\text{Requerido}} = 45,73 * 0,75 * (138 - 20)$$

$$Q_{\text{Requerido}} = 4047,105 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

$$Q_{\text{Requerido}} = 16933,49 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$

### 3.1.7.3 Cálculo del calor suministrado por las resistencias

Dato:

$P_R=4800 \text{ W}$

De la Ecuación 71 se tiene:

$$Q_{\text{Resistencias}} = P_R \cdot \frac{\text{J}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{KJ}}{1000 \text{ J}} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}}$$

$$Q_{\text{Resistencias}} = 4800 \text{ W} \cdot \frac{\text{J}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{KJ}}{1000 \text{ J}} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}}$$

$$Q_{\text{Resistencias}} = 17280 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$

### 3.1.7.4 Calor aprovechado por la mezcla, suministrada por las resistencias

De la Ecuación 70 se tiene:

$$Q_{\text{Aprovechado}} = (23,91 * 270,123) + (21,82 * 178,957) + (45,73 * 133,601)$$

$$Q_{\text{Aprovechado}} = 16473,05 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$

### 3.1.7.5 Calor perdido en el tanque de ebullición suministrado por las resistencias

$$Q_{\text{Perdido tanque}} = Q_{\text{Resistencias}} - Q_{\text{Aprovechado}}$$

Ecuación 85

$$Q_{\text{Perdido tanque}} = 17280 - 16473,05$$

$$Q_{\text{Perdido tanque}} = 806,95 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$

### 3.1.7.6 Eficiencia en el tanque de ebullición referente al calor aprovechado

De la Ecuación 75 se tiene:

$$\dot{\eta} = \left( \frac{16473,05}{17280} \right) * 100$$

$$\eta = 95 \%$$

### 3.1.7.7 Eficiencia en el tanque de ebullición referente al calor requerido.

De la Ecuación 75 se tiene:

$$\dot{\eta} = \left( \frac{16933,49}{17280} \right) * 100$$

$$\eta = 98 \%$$

### 3.1.7.8 Cálculo del área de transferencia de calor

De la Ecuación 72 se tiene:

$$A = \pi * 0,02 * 0,2 * 4$$

$$A = 0,050 \text{ m}^2$$

### 3.1.7.9 Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor

De la Ecuación 74 se tiene:

$$U = \frac{16933,49}{0,050(138 - 108)}$$

$$U = 11288,99 \text{ KJ/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### 3.1.7.10 Cálculo de la entalpía de alimentación de la mezcla ( $H_F$ )

De la Ecuación 69 se tiene:

$$H_F = 45,73 * 0,75 * (108 - 20)$$

$$H_F = 3018,18 \text{ Kcal/h}$$

$$H_F = 12628,36 \text{ KJ/h}$$

### 3.1.7.11 Cálculo de la entalpia del residuo ( $H_W$ )

De la Ecuación 69 se tiene:

$$H_W = 23,91 * 1,34 * (138 - 20)$$

$$H_W = 3780,64 \text{ Kcal/h}$$

$$H_W = \mathbf{15818,61 \text{ KJ/h}}$$

### 3.1.7.12 Cálculo del calor perdido

De la Ecuación 66 se tiene:

$$Q_P = (Q_R + H_F) - (Q_C + H_W)$$

$$Q_P = (17280 + 12628,36) - (4387,93 + 15818,61)$$

$$Q_P = \mathbf{9701,82 \text{ KJ/h}}$$

### 3.1.8 Eficiencia del equipo

De la Ecuación 76 se tiene:

$$\text{Eficiencia} = \frac{29908,36 - 4387,93}{29908,36} * 100$$

$$\text{Eficiencia} = \mathbf{85,33 \%}$$

### 3.1.9 Cálculo de masa del residuo generado, destilado y residuo de fondo

#### 3.1.9.1 Cálculo de masa del volumen de residuo generado

Datos:

$V_F$ : 86,27 L

$\rho_{\text{residuo generado}}$ : 1,304 Kg/L

De la Ecuación 20 se tiene:

$$m = 1,304 * 86,27$$

$$m = \mathbf{112,49 \text{ Kg}}$$

Como se alimenta dos veces el equipo la masa será de 224,98 Kg, referida a un mes de actividad de la industria, entonces de los dos meses la masa es 449,96 Kg  $\cong$  450 Kg de residuo generado.



### 3.1.9.2 Cálculo de masa del volumen de destilado

Datos:

D= 41,16 L

$\rho_{\text{Destilado}}$ : 1,707 kg/L

El total de destilado a los dos meses es de 164,64 Litros de disolvente recuperado.

De la Ecuación 20 se tiene:

$$m = 1,707 * 164,64$$

$$m = 281,04 \text{ Kg}$$

### 3.1.9.3 Cálculo de masa del volumen de residuo de fondo

Datos:

W= 45,11 L

$\rho_{\text{Residuo de fondo}}$ : 1,040 Kg/L

Se obtiene de los dos meses una cantidad de 180,44 Litros.

De la Ecuación 20 se tiene:

$$m = 1,040 * 180,44$$

$$m = 187,66 \text{ Kg}$$

### 3.1.10 Rendimiento del equipo

De la Ecuación 77 se tiene:

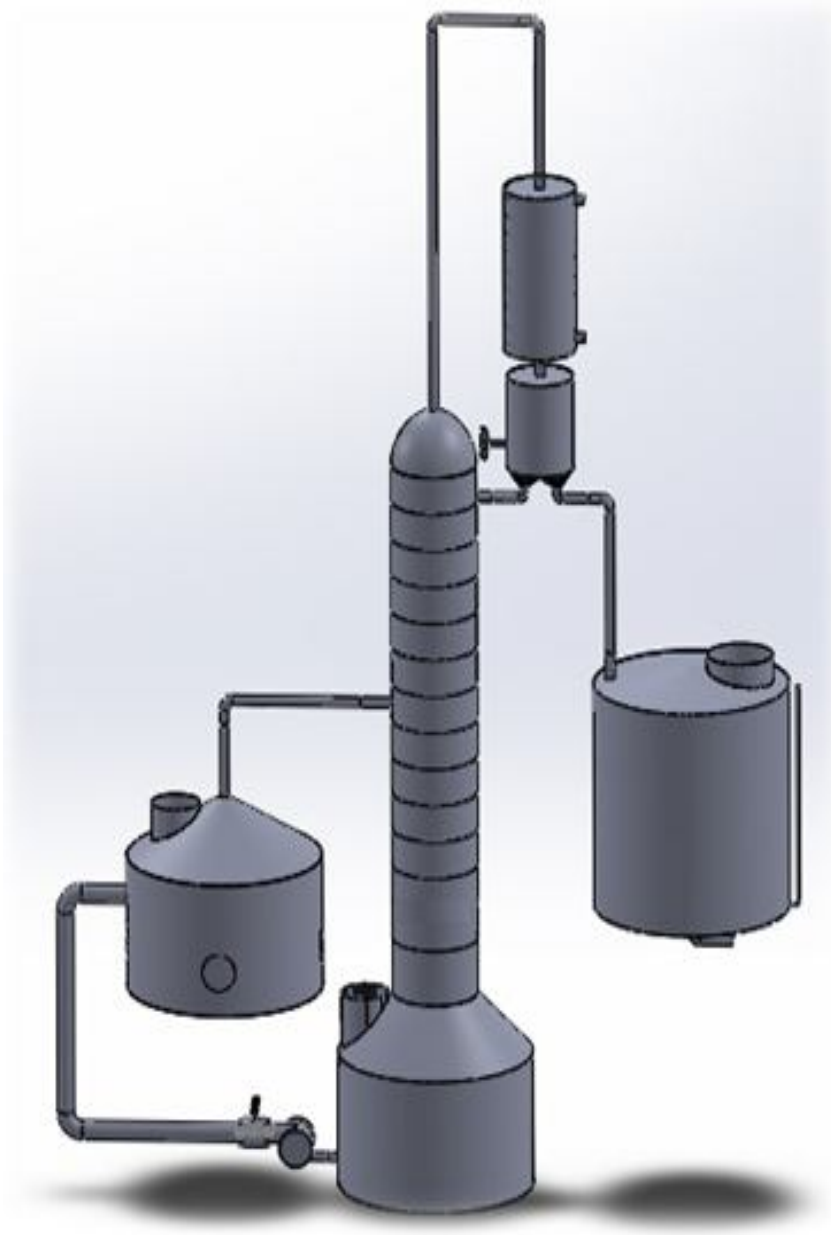
$$\text{Rendimiento} = \frac{41,16}{86,27} * 100$$

$$\text{Rendimiento} = 48 \% \text{ V/V}; R=62,45\% \text{ P/P}$$

## 3.2 Resultados

### 3.2.1 Partes de la torre de destilación

**Gráfico 7-3:** Diseño del equipo



Realizado por: ANDRADE, W. Área PU de inducalsa, 2015

**Tabla 16-3:** Partes de la torre

DESCRIPCIÓN
Tanque de ebullición
Resistencias eléctricas
Tanque de alimentación
Tubería de acero inoxidable
Válvulas de bola
Condensador
Distribución de corriente
Tubería de PVC
Tanque de almacenamiento
Bomba Doble Diafragma
Estructura de soporte

Realizado por: ANDRADE, W. Área PU de inducalsa, 2015

**3.2.2** *Parámetro de diseño***Tabla 17-3:** Parámetro de diseño

PARÁMETRO	CANTIDAD	INDICADOR
Diámetro promedio de la torre duplicado	0,26	m

Realizado por: ANDRADE, W. Área PU de inducalsa, 2015

**3.2.3** *Dimensiones de la torre de destilación***Tabla 18-3:** Dimensiones y material de la torre

DESCRIPCIÓN	PARÁMETRO	INDICADOR	MAGNITUD
TUBERÍA	Diámetro nominal 1"	0,0254	m
	Material	PVC	-
VÁLVULA DE BOLA	Diámetro nominal 1"	0,0254	m
	Material	Acero inoxidable	-
TANQUE DE EBULLICIÓN	Diámetro	0,60	m
	Altura total	0,57	m
	Diámetros del cono superior	0,26 – 0,60	m
	Altura cilindro	0,36	m
	Altura cono superior	0,16	m
	Altura cono inferior	0,05	m
	Diámetro de tapa en el cono superior	0,15	m
	Material	Acero inoxidable AISI 304 L 2B	-
RESISTENCIAS ELÉCTRICAS	Longitud	0,20	m
	Diámetro	0,08	m
	Diámetro interno	0,02	m
	Material	Acero inoxidable AISI 321 8Ø	-
	Número de resistencias empleadas	4	-
	Diámetro	0,60	m
	Altura total	0,41	m
	Diámetros del cono superior y tapa	0,20 – 0,60	m

TANQUE DE ALIMENTACIÓN	Altura cilindro	0,31	m
	Altura cono superior	0,05	m
	Altura cono inferior	0,05	m
	Material	Acero inoxidable AISI 304 L 2B	-
BOMBA DOBLE DIAFRAGMA	Puerto de fluido	0,0254 – 0,0127	m
	Conexiones de succión y descarga	Acero inoxidable 316	-
	Material del diafragma	Fluoroelastómero Viton	-
COLUMNA DE LA TORRE	Altura total de la torre	1,45	m
	Diámetro de platos	0,26	m
	Número de platos	12	-
	Distancia entre platos	0,10	m
	Distancia ultimo plato	0,35	m
	Orificios en plato	39	-
	Diámetro de orificio	0,003	m
	Distancia entre diámetro de orificio	0,0125	m
	Figura de orificio en el plato	Cuadrado	-
	Plato de alimentación	7	-
	Material	Acero inoxidable AISI 304 L 2B	-
CONDENSADOR	Diámetro	0,22	m
	Altura del cilindro	0,44	m
	Volumen	16,59	L
	Material	Acero inoxidable AISI 304 L 2B	-
DISTRIBUIDOR DE CORRIENTE	Altura	0,30	m
	Diámetro	0,20	m
	Diámetro de disco	0,20	m
	Diámetro saliente de disco	0,03	m
	Diámetro de embudo	0,12	m
	Altura del embudo	0,20	m
SERPENTIN	Longitud	2	m
	Diámetro	0,01587	m
	Material	cobre	-
TANQUE DE ALMACENAMIENTO	Altura total	0,71	m
	Diámetro	0,60	m
	Altura cono superior	0,05	m
	Altura del cilindro	0,61	m
	Altura cono inferior	0,05	m
	Diámetro de la tapa	0,20	m
	Material	Acero inoxidable AISI 304 L 2B	-

Realizado por: ANDRADE, W. Área PU de inducalsa, 2015

### 3.2.4 Condiciones de operación de la torre

**Tabla 19-3:** Condiciones de operación de la torre

DESCRIPCIÓN	PARÁMETRO	INDICADOR	MAGNITUD
TANQUE DE EBULLICIÓN	Temperatura mínima	108	°C
	Temperatura máxima	138	°C
	Altura de alimentación	0,33	m
	Flujo de alimentación	45,73	Kg/h
	Volumen de alimentación	086,27	L
	Fracción de alimentación	0,52	-
	Calor requerido	16933,49	KJ/h
	Área de transferencia	0,050	m <sup>2</sup>
RESISTENCIAS ELÉCTRICAS	Coeficiente global de transferencia	11288,99	KJ/h m <sup>2</sup> C
	Potencia	1200	w
	Voltaje	220	v
TANQUE DE ALIMENTACIÓN	Temperatura máxima	165	°C
	Temperatura de operación	20	°C
BOMBA DOBLE DIAFRAGMA	Altura de llenado	0,31	m
	Temperatura máxima del fluido	120	°C
COLUMNA DE LA TORRE	Caudal máximo	419	L/min
	Temperatura mínima	108	°C
	Temperatura máxima	138	°C
	Temperatura promedio	122,24	°C
CONDENSADOR	Presión de operación	710	mm Hg
	Temperatura mínima	12	°C
	Temperatura máxima	138	°C
	Temperatura de condensación	50,22	°C
	Temperatura de enfriamiento	18	°C
	Flujo de vapor	38,84	Kg/h
DISTRIBUIDOR DE CORRIENTE	Flujo de agua	58,24	Kg/h
	Giro del disco	1	min
TANQUE DE ALMACENAMIENTO	Temperatura máxima	60	°C
	Temperatura de operación	30	°C
	Temperatura en reposo	17 - 20	°C
	Altura de llenado	0,58	m

Realizado por: ANDRADE, W. Área PU de inducalsa, 2015

### 3.3 Análisis y discusión de resultados

Las muestras residuales de percloroetileno – silicona fueron tomadas del proceso de lavado de las suelas, en forma aleatoria simple, debido a que, se produce una saturación del PERC puro con la silicona procedente de las suelas de zapatos al ser lavadas en la canastilla, resultando la mezcla al cabo de dos meses de uso con 48% silicona y 52% PERC.

Mediante análisis las muestras, se obtuvieron datos favorables al comparar sus valores con la hoja de seguridad DIRSA-PERCLOROETILENO y OXIQUIM.SA con pH 7,48; densidad 1700 Kg/m<sup>3</sup>; viscosidad 0,88 Cp, y el espectro IR de PERC puro y destilado demostró que el líquido recuperado

tiene las mismas características que el adquirido por la industria, con un 100% de pureza, el solvente es apto para ser reutilizado, disminuyendo los costos de producción y menor generación de contaminantes peligrosos para el ambiente.

Con los datos experimentales de la operación de destilación simple se determinó las variables de proceso y con los requerimientos de inducalsa de acuerdo a su necesidad, se realizó el dimensionamiento del equipo, un tanque de ebullición y de alimentación con 4 resistencias en su interior con capacidad de 87,26 litros, para obtener el producto a la pureza del 100 % la columna consta de 12 platos con diámetro 0,26 m y separados en 0,10 m, el plato de alimentación número 7 recibirá el vapor saturado, lo cual, no afecta térmicamente el equilibrio líquido-vapor dentro de la columna, se puede tratar la mezcla con mayor saturación, pero, implicaría suministrar mayor energía para calentar la mezcla y producir la evaporación y el número de etapas de contacto sería suficiente por la eficiencia de los platos del 92 %, y una eficiencia humedad de arrastre fraccional del 70 %.

El rendimiento del equipo es del 62,45 % P, que representa 281,04 Kg recuperados de cada 450 Kg de residuo generado, en el residuo de fondo quedan 28 Kg de PERC que no se recuperan, debido a que, hay que incrementar la temperatura sobre los 150 °C, que es el límite para recuperar este producto puro, de esta manera, evitar la reacción química dentro de la operación, el valor económico que tiene el producto a recuperar en el mercado es de 1,33 USD/Kg y con la cantidad recuperada se favorece una menor adquisición del solvente y un ahorro para la industria.

La eficiencia de la torre es del 85,33% indicando que la mayor parte de la energía es aprovechada, es decir, que el resto de energía se pierde hacia exterior por medio de las paredes del equipo y como entalpía del residuo de fondo generado, al emplear un aislante térmico la eficiencia sería del 91%.

### 3.4 Propuesta

#### 3.4.1 Costos de inversión del proyecto

Representa todos los gastos que se han realizado durante el estudio investigativo, práctico y todos los costos directos e indirectos durante el desarrollo del proyecto, están representados principalmente por transporte, impresiones, equipos y materiales empleados, consultas de profesionales, análisis de muestras, herramientas digitales como el internet.

##### 3.4.1.1 Costos de materiales empleados y transporte

**Tabla 20-3:** Costos de materiales y transporte

Cantidad	Detalle	Valor unitario (USD)	Valor Total (USD)
600	Impresiones	0,05	30
18	Horas de Internet	0,30	5,40
60	Recipientes para muestras	0,15	9
1	Picnómetro 10 mL	22,50	22,50
1	Equipo de destilación completo con accesorios	238,82	238,82
23	Gramos de Hg	0,85	19,55
1	Tubo en U	15	15
20	Transporte	3,75	75
SUBTOTAL			415,27

Realizado por: ANDRADE, W. Área PU de inducalsa, 2015

##### 3.4.1.2 Costos por recursos humanos

**Tabla 21-3:** Costos de recursos humanos

Cantidad	Denominación	Costo (USD)
1	Proponente	450
1	Tutor	336
1	Miembro del tribunal	84
SUBTOTAL		870

Realizado por: ANDRADE, W. Área PU de inducalsa, 2015

##### 3.4.1.3 Costo total del estudio realizado

**Tabla 22-3:** Costo total del estudio realizado

Denominación	Valor (USD)
Materiales y transporte	415,21
Recursos humanos	870
<b>TOTAL</b>	<b>1285,21</b>

Realizado por: ANDRADE, W. Área PU de inducalsa, 2015

### 3.4.2 Costos de inversión para la construcción del equipo

**Tabla 23-3:** Costo del equipo

Concepto	Valor Total (USD)
<ul style="list-style-type: none"><li>• Tanque de ebullición</li><li>• Resistencias eléctricas</li><li>• Termocupla</li><li>• Tanque de alimentación</li><li>• Bomba doble diafragma</li><li>• Columna de la torre</li><li>• Condensador</li><li>• Distribuidor de corriente</li><li>• Tanque de almacenamiento</li><li>• Estructura de soporte</li></ul>	9700

Realizado por: ANDRADE, W. Área PU de inducalsa, 2015

### 3.4.3 Análisis de costos de residuos, operacional del equipo y beneficio económico para la industria

#### 3.4.3.1 Costo del residuo generado

El valor económico para la disposición final del residuo generado es de 0,90 ctvs., de dólar americano por cada kilogramo, la cantidad de residuo generado es de 450 kilogramos cada dos meses, proveniente del lavado de suelas.

$$C_{rg} = R_{rg} * P_{df} \quad \text{Ecuación 86}$$

$$C_{rg} = 450\text{Kg} * 0,90\text{ctvs/Kg}$$

$$C_{rg} = 405 \text{ USD}$$

Dónde:

$C_{rg}$ = Costo de residuo generado, USD

$R_{rg}$ = Kilogramos de residuo generado, Kg

$P_{df}$ = Precio por disposición final, ctvs/Kg



### 3.4.3.2 Costo del residuo de fondo obtenido de la torre

El residuo de fondo procedente de la torre de destilación de los dos meses es de 187,66 Kg y su disposición final tiene un costo económico de 0,90 ctvs.

$$C_{rw} = R_{rw} * P_{df} \quad \text{Ecuación 87}$$

$$C_{rw} = 187,66 * 0,90$$

$$C_{rw} = 168,89 \text{ USD}$$

Dónde:

$C_{rw}$ = Costo de residuo de fondo, USD

$R_{rw}$ = Kilogramos de residuo de fondo, Kg

$P_{df}$ = Precio por disposición final, ctvs/Kg

### 3.4.3.3 Valor económico del destilado

El valor económico que tiene el PERC al ser adquirido por inducalsa es de 1,33 USD por cada kilogramo, en la operación de destilación se obtiene 281,04 Kg.

$$V_{ed} = R_{de} * P_{as} \quad \text{Ecuación 88}$$

$$V_{ed} = 281,04 * 1,33$$

$$V_{ed} = 373,78 \text{ USD}$$

Dónde:

$V_{ed}$ = Costo del destilado, USD

$R_{de}$ = Kilogramos de destilado, Kg

$P_{as}$ = Precio por adquisición del solvente, USD/Kg

### 3.4.3.4 Costo de operación de la torre por el operario

Operario con sueldo básico en inducalsa de 364 USD y que opera la torre de destilación durante dos días cada dos meses es considerado dentro del trabajo de un operario con actividad en la industria en el área de PU.

### 3.4.3.5 Costo de consumo de energía eléctrica de la torre

La operación se realizara dentro de la zona horaria comprendida entre las 07:00 hasta las 18:00 en cualquier día de la semana de Lunes a Viernes, en este horario la energía eléctrica tiene un costo de 0,78 ctvs., por cada KW consumido, el equipo es utilizado 9,84 horas en total.

$$C_{ec} = h_{eq} * T_{ce} \quad \text{Ecuación 89}$$

$$C_{ec} = 9,84 * 0,78$$

$$C_{ec} = 7,68 \text{ USD}$$

Dónde:

$C_{ec}$ = Costo de energía eléctrica consumida, USD

$h_{eq}$ = Horas utilizado el equipo, h

$T_{ce}$ = Tarifa de consumo de energía del horario, ctvs/h

#### 3.4.3.6 Beneficio económico para la industria

$$B_{inducalsa} = V_{ed} + (C_{rg} - (C_{rw} + C_{ec})) \quad \text{Ecuación 90}$$

$$B_{inducalsa} = 373,78 + (405 - (168,89 + 7,68))$$

$$B_{inducalsa} = 373,78 + (405 - 176,57)$$

$$B_{inducalsa} = 373,78 + 228,43$$

$$B_{inducalsa} = 602,21 \text{ USD}$$

Dónde:

$B_{inducalsa}$ = Beneficio económico para la industria, USD

$V_{ed}$ = Costo del destilado, USD

$C_{rg}$ = Costo de residuo generado, USD

$C_{rw}$ = Costo de residuo de fondo, USD

$C_{ec}$ = Costo de energía eléctrica consumida, USD

La inversión de la torre tiene un costo de 9700 USD, puede ser recuperado en tres años y cinco meses, representado en los valores económicos de la cantidad de disposición final y el solvente recuperado.

$$PAGAR = C_{rg} - V_{ed}$$

$$PAGAR = 405 - 373,78$$

$$PAGAR = 31,22 \text{ USD}$$

La industria pagara 31,22 USD de los 405 USD que pagaba anteriormente por disposición final.

## CONCLUSIONES

- Mediante la operación de destilación y con el método de McCabe - Thiele, se diseñó la columna de destilación, pero también existen otros métodos para diseñar columnas como la convergencia a las columnas complejas y a los sistemas de columna, y el método 2N de Newton-Raphson.
- La torre de destilación permite obtener un producto destilado con una pureza del 100%, con densidad de  $1700 \text{ Kg/m}^3$  y pH de 7,48 que es semejante la del PERC puro adquirido y cumple dentro del límite de la ficha de seguridad DIRSA y el valor experimental calculado del solvente.
- La operación se realiza en batch, con un volumen de alimentación al equipo de 87,26 L, produciendo 41,16 L de producto destilado PERC y un residuo de fondo de la torre de 45,11 L.
- Las variables de proceso son: la temperatura óptima de operación de la torre en  $122,24 \text{ }^\circ\text{C}$ , una presión de 710 mmHg, las temperaturas en rango de operación del tanque del equipo es de 108 a  $138 \text{ }^\circ\text{C}$  y la temperatura de trabajo del condensador es de  $50,22 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Para los cálculos de ingeniería se ha determinado: la cantidad de calor necesaria  $16933,49 \text{ Kg/h}$  para producir la evaporación y destilación del solvente en un tiempo de 166 minutos en cada batch, un intercambiador de calor con un flujo de  $58,24 \text{ Kg/h}$  necesarios para condensar y obtener el destilado a  $30^\circ\text{C}$ .
- El equipo diseñado tiene un rendimiento del 48% en volumen, pero en peso es del 62,45% y una eficiencia del 85,33%.
- El beneficio para la industria es considerable de un valor a pagar de 405 USD actualmente, se reduce a un costo de 31,22 USD pago de por disposición final, es decir, el ahorro para la empresa es de 373,78 USD cada dos meses.
- También se puede tratar otras sustancias cuya volatilidad relativa sean menores a 3,60.

## RECOMENDACIONES

- Cumplir todos los parámetros mencionados en éste texto para la construcción del equipo, revisar que las dimensiones sean las descritas para evitar alteraciones, al ensamblar las tuberías y conexiones que estén totalmente herméticas para evitar fugas del fluido.
- El lugar donde se ubique el equipo debe tener espacio para la alimentación, descarga, almacenamiento de los fluidos y movilización de los operadores, buena ventilación y para casos de emergencia colocar un botiquín de primeros auxilios y extintor en el área.
- La materia prima que es el residuo generado por el lavado de suelas se debe almacenar en tanques de acero y estar bien cerrados por un tiempo máximo de un mes hasta realizar la operación de destilación para recuperar el solvente y reutilizarlo nuevamente en la línea de producción.
- Limpiar el equipo después de usarlo.
- No utilizar otras sustancias para lo cual no ha sido diseñado el equipo.
- Durante la operación del equipo se debe utilizar EPP (equipos de protección personal) como gafas, mandil, guantes, mascarilla.
- Antes de encender el equipo se debe verificar la conexión eléctrica de 220 V para evitar su mal funcionamiento.
- Durante la operación no abrir la tapa del tanque de ebullición.
- Emplear aislante térmico para evitar la pérdida de calor a través de las paredes de la columna hacia el exterior y así tener una eficiencia energética del 91%.
- No se puede tratar el residuo de fondo de la columna para obtener otro producto por el bajo rendimiento que se obtendría y no sería rentable por lo que no se recomienda construir otro equipo.

## BIBLIOGRAFIA

BANDERAS, A. **Operaciones Unitarias**. 2ª.ed, México D.F-México. Mc Graw Hill. 1997, pp. 38-45

DIRSA. **Ficha de seguridad DIRSA – PERC**. DISOLVENTES REUNIDAS S.A, 2006, pp.1-9  
<http://www.dirsadisolventes.com/pdf/FDS%20PERCLOROETILENO.pdf>  
2014-11-25

GARVACH. **Cálculo del diámetro y altura de la torre de destilación**. BuenasTareas.com. pp.1  
<http://www.buenastareas.com/ensayos/Calculo-De-Diametro-y-Altura-De/40482115.html>  
2014-11-25

GEANKOPLIS C.J. **Procesos de transporte y operaciones unitarias**. 3ª.ed., México D.F-México. Continental S.A. 1998, pp. 712-743

INFORMACIÓN. **Actividad y ubicación de la industria**. Quito-Ecuador. INDUCALSA. 1974, pp. 1  
<http://www.edina.com.ec/2553/17/31/inducalsa-bunky/calzado-calzado-fabricas>  
2014-11-25

Mc CABE, W. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química**. 4ta.ed., Madrid-España. McGraw Hill. 1998, pp. 987-1058.

OCÓN, J. **Problemas de Ingeniería Química**. 4ª.ed., México D.F-México. Aguilar. 1980, pp. 280-372

PERRY R. / CHILTON C. **Manual del Ingeniero Químico**. 5ª.ed., México D.F-México. Mc Graw – Hill. 1990, Tomo II. Sección 13. pp. 3.

PERRY R. /GREEN D. **Manual del Ingeniero Químico**. 3ª.ed., Barcelona – España. Mc Graw Hill. 1992, pp.

PERRY., R. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª.ed., México D.F-México. Mc Graw Hill. 1994, Tomo IV. Sección 13. pp.13-29

PERRY., R. / GREEN, D.W. **Chemical Engineers' Handbook**. 7ª.ed., México D.F-México. Mc Graw Hill. 1997, Tomo IV. Sección 13. pp.1-18

REED., Ch. E. **Las siliconas (Química Industrial y sus aplicaciones)**. Cedel, pp.5-9  
<http://www.cornella.cat/files/contenidos/Educaci%C3%B3/Treballs%20de%20Recerca%202009/2011/treballs/TR11%2024%20Bienvenidos%20al%20mundo%20de%20la%20silicona.pdf>  
2014-11-25

Treybal R. **Operaciones de Transferencia de masa**. 2ª.ed., México D.F-México. Mc Graw – Hill. 1980, pp. 378-510

SMITH, J.M. / VAN NESS, H.C. **Introducción a la Termodinámica**. 5ª.ed., México D.F-México. Mc Graw – Hill. 1997, pp. 59-70

## GLOSARIO

A	Área (m <sup>2</sup> )
°C	Grados centígrados
Cp	Capacidad calorífica
cm	Centímetros
D	Flujo de destilado (Kg/h)
E	Eficiencia
F	Flujo de alimentación (Kg/h)
g	Gravedad (m/ s <sup>2</sup> ); Gramos
h	Hora; altura (m)
H	Humedad (%)
h <sub>fte</sub>	Altura de llenado en tanque de ebullición (m)
h <sub>ftf</sub>	Altura de llenado en tanque de alimentación (m)
h <sub>tal</sub>	Altura de llenado en tanque de almacenamiento (m)
kg	Kilogramos
kg/h	Kilogramos por hora
kW/h	Kilowatt por hora
L	Litros; Longitud (m)
m	Metros
ṁ	Flujo (Kg/h)
mm	Milímetros
m/s	Metros por segundo
mN/m	Metros Newton por metro
η	Eficacia mecánica (%)
P	Presión (mm Hg)
PERC	Percloroetileno
PU	Poliuretano
Q <sub>L</sub>	Calor latente (KJ/h)
Q <sub>R</sub>	Calor de las resistencias (KJ/h)
RG	Residuo generado
RT	Reflujo externo
T	Temperatura (°C)
U	Coefficiente global de transferencia de calor
V	Volumen (m <sup>3</sup> , L)
V <sub>C</sub>	Volumen de cilindro (L)
V <sub>ci</sub>	Volumen de cono inferior (L)
V <sub>cic</sub>	Volumen cono inferior + cilindro con resistencias en su interior (L)
V <sub>cis</sub>	Volumen de cono inferior y superior (L)
V <sub>cr</sub>	Volumen cilindro con resistencias en su interior (L)
V <sub>cs</sub>	Volumen cono superior (L)
V <sub>F</sub>	Volumen de alimentación (L)
V <sub>Fci</sub>	Volumen de alimentación sin volumen de cono inferior (L)
V <sub>hf</sub>	Volumen de altura de alimentación (L)
V <sub>r</sub>	Volumen de las resistencias (L)
VT <sub>ta</sub>	Volumen tal tanque de alimentación, almacenamiento (L)
VT <sub>te</sub>	Volumen total tanque de ebullición (L)
y	Fracción vapor
X	Fracción líquido

%	Porcentaje
$\alpha$	Volatilidad relativa
$\emptyset$	Diámetro (m)
$\sigma$	Esfuerzo, tensión
$\varphi$	Arrastre
$\Delta$	Variación
$\eta$	Eficiencia (%)
$\lambda$	Calor latente
$\rho$	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_L$	Densidad del líquido (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_v$	Densidad de vapor (kg/m <sup>3</sup> )
$\Sigma$	Sumatoria

# ANEXO A FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD – PROPIEDADES Y SILICONA

## I

### 9 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

#### 9.1 Información de propiedades físicas y químicas básicas:

Para completar la información ver la ficha técnica/hoja de especificaciones del producto.

##### Aspecto físico:

Estado físico a 20 °C: Líquido  
 Aspecto: No determinado  
 Color: No determinado  
 Olor: No determinado

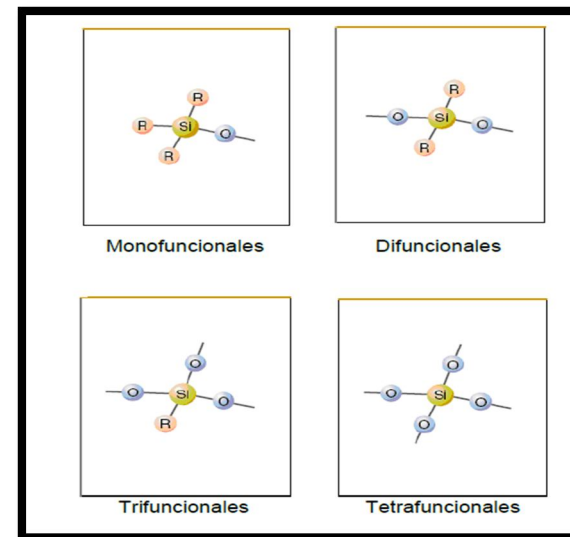
##### Volatilidad:

Temperatura de ebullición a presión atmosférica: 121 °C  
 Presión de vapor a 20 °C: 1945 Pa  
 Presión de vapor a 50 °C: 8480 Pa (8 kPa)  
 Tasa de evaporación a 20 °C: No relevante \*

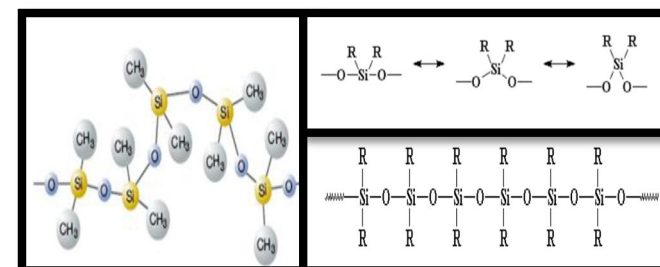
##### Caracterización del producto:

Densidad a 20 °C: 1621 kg/m<sup>3</sup>  
 Densidad relativa a 20 °C: 1,621  
 Viscosidad dinámica a 20 °C: 0,86 cP  
 Viscosidad cinemática a 20 °C: 0,53 cSt  
 Concentración: No relevante \*  
 pH: No relevante \*  
 Densidad de vapor a 20 °C: No relevante \*

## II



## III



### NOTAS

- I:** Propiedades físicas y químicas.
- II:** Unidades estructurales químicas.
- III:** Enlaces químicos.

### CATEGORÍA DEL DIAGRAMA

CERTIFICADO   
 APROBADO   
 POR APROBAR   
 POR CALIFICAR   
 POR ELIMINAR   
 INFORMACIÓN

# ESPOCH

ANDRADE HOYOS WILINGTON EDUARDO

**DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA  
 RECUPERACIÓN DE PERCLORETILENO  
 MEDIANTE EL MÉTODO DE  
 DESTILACIÓN EN INDUCALSA**

**ESCALA:**

A<sub>4</sub>

**LÁMINA**

1

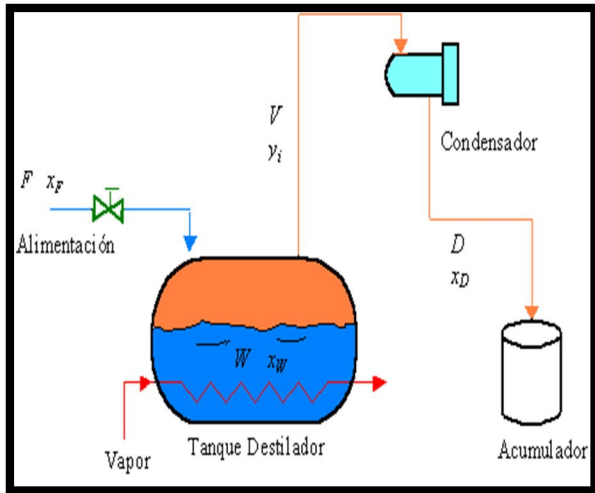
**FECHA**

2015/04/29

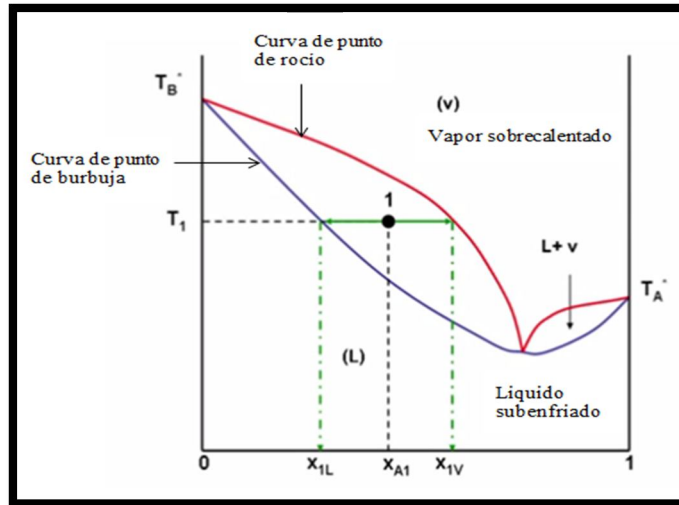


## ANEXO B DESTILACIÓN Y RESISTENCIA ELÉCTRICA

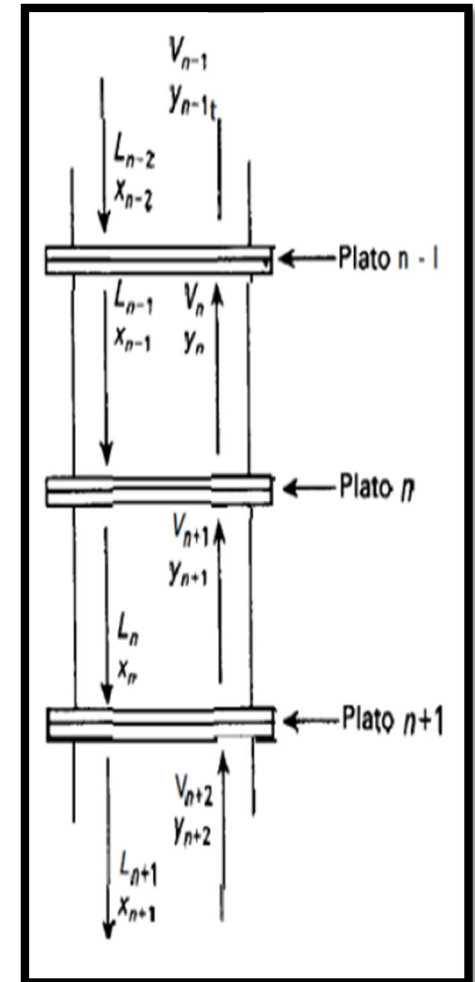
**I**



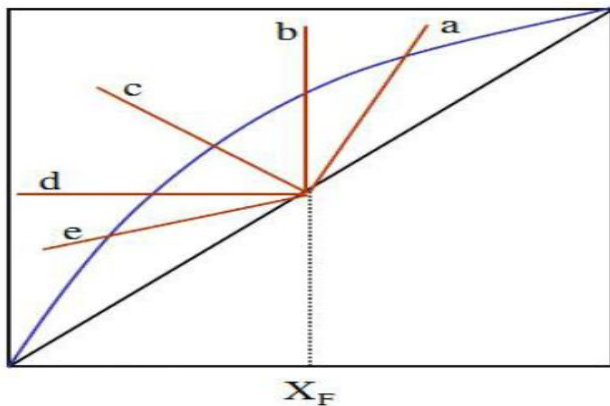
**II**



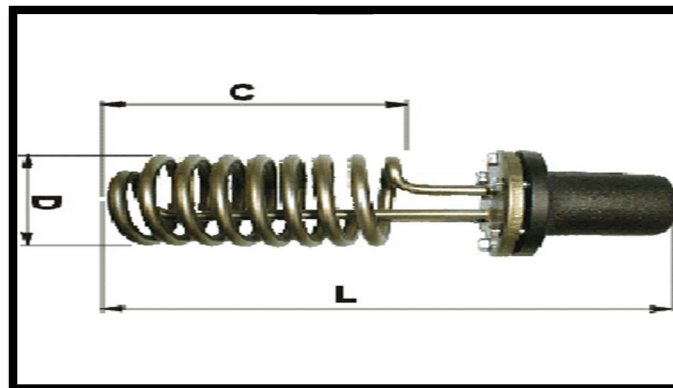
**III**



**IV**



**V**



### NOTAS

- I:** Destilación simple.
- II:** Concentración VS temperatura.
- III:** Acción de platos.
- IV:** Condición térmica de alimentación.
- V:** Resistencia eléctrica.

### CATEGORÍA DEL DIAGRAMA

CERTIFICADO  
 APROBADO  
 POR APROBAR  
 POR CALIFICAR  
 POR ELIMINAR  
 INFORMACIÓN



# ESPOCH

ANDRADE HOYOS WILINGTON EDUARDO

**DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA  
 RECUPERACIÓN DE PERCLORETILENO  
 MEDIANTE EL MÉTODO DE  
 DESTILACIÓN EN INDUCALSA**

ESCALA:	LÁMINA	FECHA
A <sub>4</sub>	2	2015/04/29

ANEXO C INDUCALSA

I



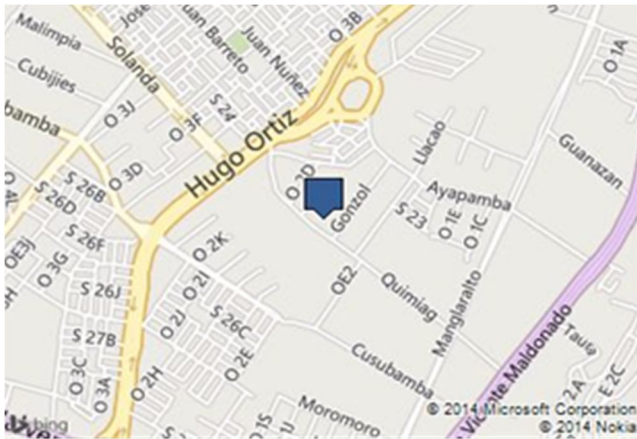
III



V



II



IV



VI



NOTAS

- I: Área administrativa.
- II: Ubicación.
- III: Mezclador de silicona.
- IV: Canastilla de lavado de suelas.
- V: Molde de suelas.
- VI: Suela.

CATEGORÍA DEL DIAGRAMA

- CERTIFICADO
- APROBADO
- POR APROBAR
- POR CALIFICAR
- POR ELIMINAR
- INFORMACIÓN

**ESPOCH**

ANDRADE HOYOS WILINGTON EDUARDO

**DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA RECUPERACIÓN DE PERCLORETILENO MEDIANTE EL MÉTODO DE DESTILACIÓN EN INDUCALSA**

ESCALA:	LÁMINA	FECHA
A <sub>4</sub>	3	2015/04/29

## ANEXO D DESTILACIÓN SIMPLE Y MUESTRAS

**I**



**II**



### NOTAS

**I:** Destilación simple.  
**II:** Muestras de destilado y residuo.

### CATEGORÍA DEL DIAGRAMA

CERTIFICADO   
 APROBADO   
 POR APROBAR   
 POR CALIFICAR   
 POR ELIMINAR   
 INFORMACIÓN

# ESPOCH

ANDRADE HOYOS WILINGTON EDUARDO

**DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA  
 RECUPERACIÓN DE PERCLORETILENO  
 MEDIANTE EL MÉTODO DE  
 DESTILACIÓN EN INDUCALSA**

**ESCALA:**

A<sub>4</sub>

**LÁMINA**

4

**FECHA**

2015/04/29

## ANEXO E pH Y VISCOSIDAD

**I**



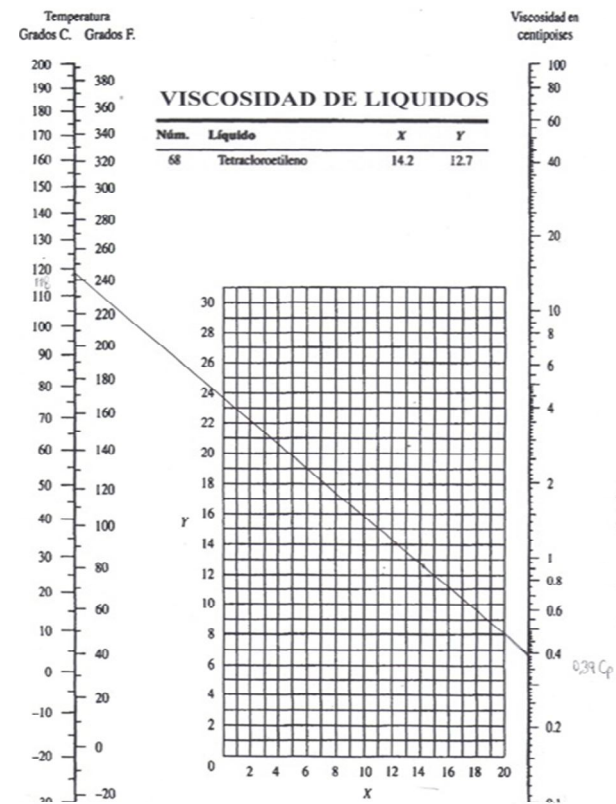
**II**



**III**



**IV**



### NOTAS

- I:** Determinación del pH del destilado.
- II:** Determinación de la densidad de muestras.
- III:** Viscosidad de la silicona.
- IV:** Viscosidad del PERC en tablas; 0,39

### CATEGORÍA DEL DIAGRAMA

CERTIFICADO  
 APROBADO  
 POR APROBAR  
 POR CALIFICAR  
 POR ELIMINAR  
 INFORMACIÓN



# ESPOCH

ANDRADE HOYOS WILINGTON EDUARDO

**DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA  
 RECUPERACIÓN DE PERCLORETIENO  
 MEDIANTE EL MÉTODO DE  
 DESTILACIÓN EN INDUCALSA**

**ESCALA:**

A<sub>4</sub>

**LÁMINA**

5

**FECHA**

2015/04/29

# ANEXO F INFORME DE CALIBRACIÓN E INSTRUCTIVO DE VISCOSIDAD

## I



### INFORME TÉCNICO DE CALIBRACIÓN DE BALANZAS.

**TRANSPORTE**

**R&M**  
MATERIAL HANDLING

**Tractel**

**HU-LIFT**  
Puentes grúa, Trolleys eléctricos y mecánicos a cable y cadena. Sistemas de electrificación. Trolleys - malecones - winches - trolleys. Carretillas y aplicadores hidráulicos. Montacargas eléctricos.

**POTENCIA**

**MOTOVARIO**

**ABB**  
Motorreductores coaxiales y ortogonales. motorvariadores de velocidad. Variadores electrónicos (inverters).

**PESAJE**

**TEDEAH DIBAL**  
Balanzas mecánicas, electrónicas de piso y pedestal. Sistemas industriales de pesaje y dosificación. Balanzas tipo supermercado.

**MAQUINAS**

**HU-LIFT**

**PROMAN**  
Teleros, fresas de banda y engranajes. Tornos paralelos automáticos. Fresadoras universales y de torneta. Cortadoras de serra - dobladoras. Accesorios en general.

INFORME No: 1

FECHA: 26 - Mayo - 2014

CLIENTE: INDUCALSA

DIRECCION: QUIMIAG OE2-106 Y GONZOL

**DESCRIPCION**

EQUIPO: Balanza Electrónica SERIE: \_\_\_\_\_

MARCA: HBM CAPACIDAD: 500Kg

MODELO: A12SS SENSIBILIDAD: 0.1Kg

CODIGO: \_\_\_\_\_

CERO INICIAL:

BIEN:  MAL:  DIFERENCIA: \_\_\_\_\_

LECTURA DE LOS EQUIPOS

LECTURA INICIAL			LECTURA FINAL		
PATRON	LECTURA	ERROR	PATRON	LECTURA	ERROR
0.0Kg	0.0Kg	0.0Kg	0.0Kg	0.0Kg	0.0Kg
25.0Kg	25.0Kg	0.0Kg	25.0Kg	25.0Kg	0.0Kg
50.0Kg	49.5Kg	0.5Kg	50.0Kg	50.0Kg	0.0Kg
75.0Kg	74.5Kg	0.5Kg	75.0Kg	75.0Kg	0.0Kg
100.0Kg	99.0Kg	1.0Kg	100.0Kg	100.0Kg	0.0Kg
150.0Kg	149.0Kg	1.0Kg	150.0Kg	150.0Kg	0.0Kg

**OBSERVACIONES:**

El equipo debe estar ubicado sobre una superficie correctamente nivelada para evitar errores en la dosificación.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**SOPORTE TECNICO**


Los equipos quedan calibrados con pesas patrón certificadas por el INEN hasta la próxima calibración.

RESPONSABLE:

CARGO: Técnico Mantenimiento

NOMBRE: Ing. José Paneluisa

## II

 INDUSTRIA NACIONAL DE CALZADO S.A	Título: INSTRUCTIVO PARA DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DE LOS ADHESIVOS NEOPRENO Y POLIURETANO	Código: SQI 03
	Revisión: 2	

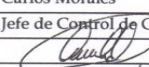
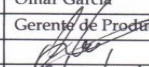
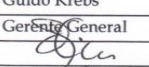
### MÉTODO DE ENSAYO 11

#### EQUIPO

Nombre: VISCOSÍMETRO  
 Marca: BROOKFIELD  
 Modelo: RVF, 35004

#### Procedimiento

1. Colocar 250 ml del fluido en un recipiente graduado con esta medida.
2. Colocar la aguja N°. 4 a 20 RPM.; y con una temperatura promedio del fluido entre 20 – 22 ° C.
3. Colocar el recipiente debajo de la aguja y descenderla hasta la señal de la aguja.
4. Encender el equipo y esperar que la aguja del disco se estabilice.
5. Levantar la palanca que sujeta la señal de medida y apagar el motor de rotación.
6. Registrar el valor de la escala.
7. Multiplicar el valor obtenido por 100 y registrar en la hoja de especificaciones.
8. Si el valor difiere del especificado, volver a realizar la medición con nuevas muestras. Especificación para Neopreno: 3700 a 4300 centipoins  
Especificación para Poliuretano: 3400 a 3900 centipoins
9. Si se repite la diferencia rechazar el lote.

	Elaborado :	Revisado:	Aprobado:
Nombre:	Carlos Morales	Omar García	Guido Krebs
Cargo:	Jefe de Control de Calidad	Gerente de Producción	Gerente General
Firma:			
Fecha:	28/09/06	28/09/06	28-09-06

### NOTAS

**I:** Informe técnico de calibración de balanzas.

**II:** Instructivo para determinación de viscosidad.

### CATEGORÍA DEL DIAGRAMA

CERTIFICADO

APROBADO

POR APROBAR

POR CALIFICAR

POR ELIMINAR

INFORMACIÓN

## ESPOCH

ANDRADE HOYOS WILINGTON EDUARDO

### DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA RECUPERACIÓN DE PERCLORETILENO MEDIANTE EL MÉTODO DE DESTILACIÓN EN INDUCALSA

<b>ESCALA:</b>	<b>LÁMINA</b>	<b>FECHA</b>
A <sub>4</sub>	6	2015/04/29

## ANEXO G COLOR DE MUESTRAS

**I**

**II**

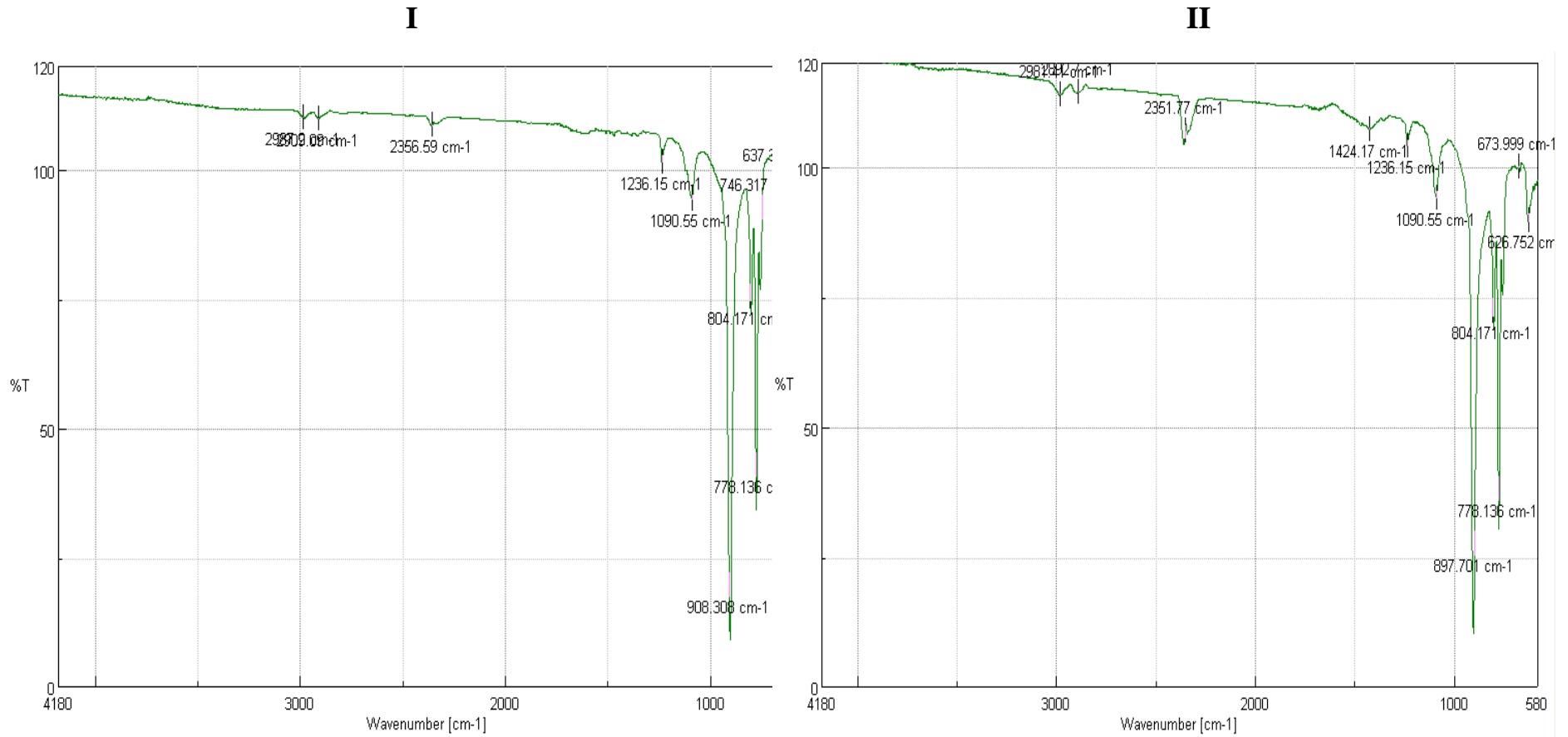
**III**

**IV**



<b>NOTAS</b>	<b>CATEGORÍA DEL DIAGRAMA</b>	<b>ESPOCH</b>	<b>DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA RECUPERACIÓN DE PERCLORETIENO MEDIANTE EL MÉTODO DE DESTILACIÓN EN INDUCALSA</b>			
<b>I:</b> Muestra de residuo PERC - SILICONA.	CERTIFICADO <input type="checkbox"/> APROBADO <input checked="" type="checkbox"/> POR APROBAR <input type="checkbox"/> POR CALIFICAR <input type="checkbox"/> POR ELIMINAR <input type="checkbox"/> INFORMACIÓN <input type="checkbox"/>	ANDRADE HOYOS WILINGTON EDUARDO	<b>ESCALA:</b>	<b>LÁMINA</b>	<b>FECHA</b>	
<b>II:</b> Muestra de residuo de fondo del destilado.		A <sub>4</sub>	7	2015/04/29		
<b>III:</b> Muestra del destilado recuperado.						
<b>IV:</b> Destilado, color por doble enlace.						

## ANEXO H COMPARACION DE IR



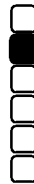
### NOTAS

**I:** Muestra de PERC puro.

**II:** Muestra de destilado.

### CATEGORÍA DEL DIAGRAMA

CERTIFICADO  
 APROBADO  
 POR APROBAR  
 POR CALIFICAR  
 POR ELIMINAR  
 INFORMACIÓN



# ESPOCH

ANDRADE HOYOS WILINGTON EDUARDO

**DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA  
 RECUPERACIÓN DE PERCLORETILENO  
 MEDIANTE EL MÉTODO DE  
 DESTILACIÓN EN INDUCALSA**

**ESCALA:**

A<sub>4</sub>

**LÁMINA**

8

**FECHA**

2015/04/29

## ANEXO I DOCUMENTOS DEL IR

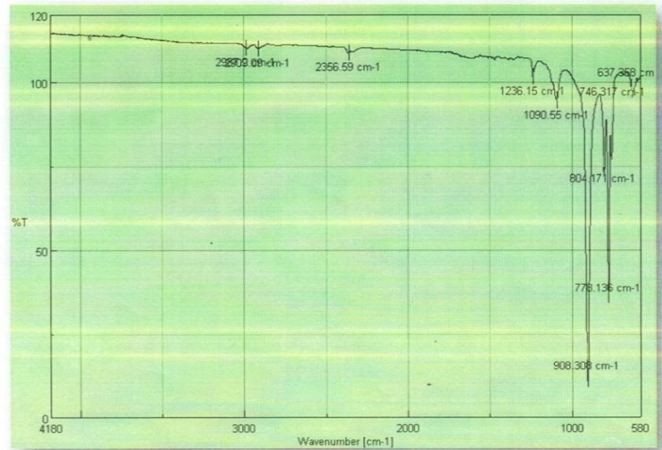
### I



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**LABORATORIO DE ANÁLISIS INSTRUMENTAL**  
 Panamericana Sur-Km 11/2- telefax: 2998-330 ext. 330-163 Riobamba - Ecuador



Espectro IR PERC - PURO



*[Signature]*  
 Lic. Fausto Leónidas Tapia Hernández  
 TÉCNICO DOCENTE LABORATORIO DE ANÁLISIS INSTRUMENTAL FAC.  
 DE CIENCIAS  
 CI: 060153699-8  
 Teléfono: 0987063935  
 Email: [ftapia@esPOCH.edu.ec](mailto:ftapia@esPOCH.edu.ec)

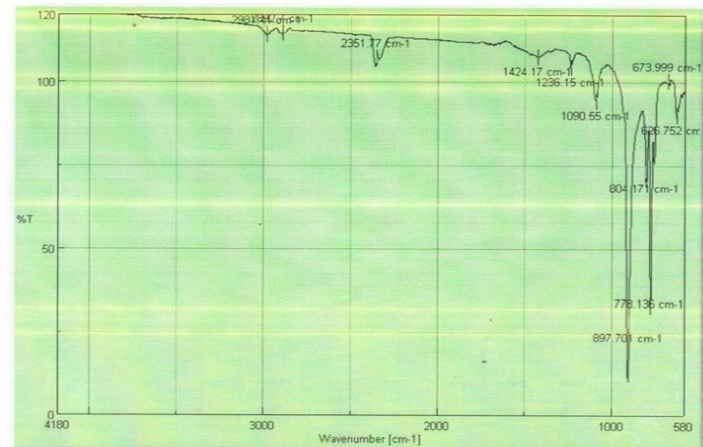
### II



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**LABORATORIO DE ANÁLISIS INSTRUMENTAL**  
 Panamericana Sur-Km 11/2- telefax: 2998-330 ext. 330-163 Riobamba - Ecuador



Espectro IR DESTILADO - DISOLVENTE RECUPERADO



*[Signature]*  
 Lic. Fausto Leónidas Tapia Hernández  
 TÉCNICO DOCENTE LABORATORIO DE ANÁLISIS INSTRUMENTAL FAC.  
 DE CIENCIAS  
 CI: 060153699-8  
 Teléfono: 0987063935  
 Email: [ftapia@esPOCH.edu.ec](mailto:ftapia@esPOCH.edu.ec)

### NOTAS

- I:** IR de muestra de PERC puro.
- II:** IR del destilado.

### CATEGORÍA DEL DIAGRAMA

CERTIFICADO   
 APROBADO   
 POR APROBAR   
 POR CALIFICAR   
 POR ELIMINAR   
 INFORMACIÓN

# ESPOCH

ANDRADE HOYOS WILINGTON EDUARDO

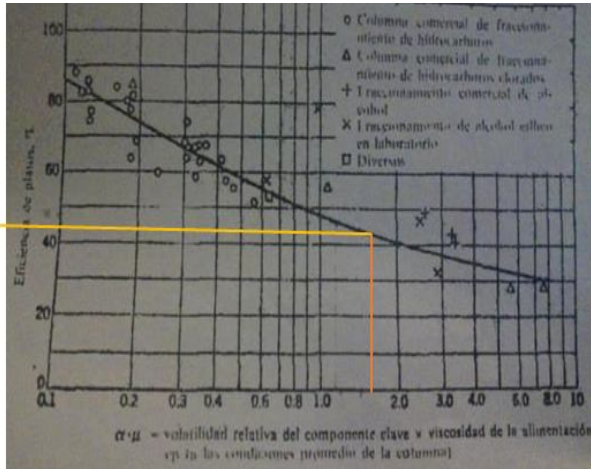
**DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA  
 RECUPERACIÓN DE PERCLORETILENO  
 MEDIANTE EL MÉTODO DE  
 DESTILACIÓN EN INDUCALSA**

ESCALA:	LÁMINA	FECHA
A <sub>4</sub>	9	2015/04/29



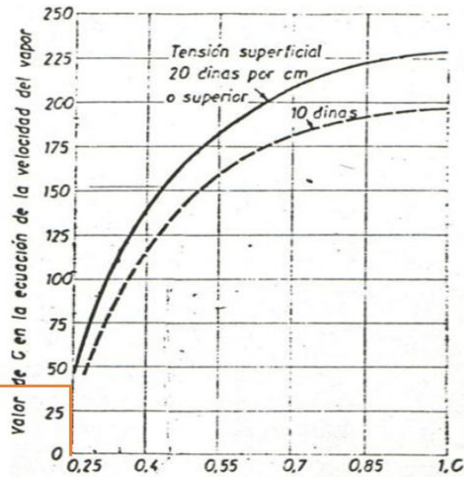
## ANEXO J GRÁFICAS DE DISEÑO

**I**



45

**II**



40

**III**

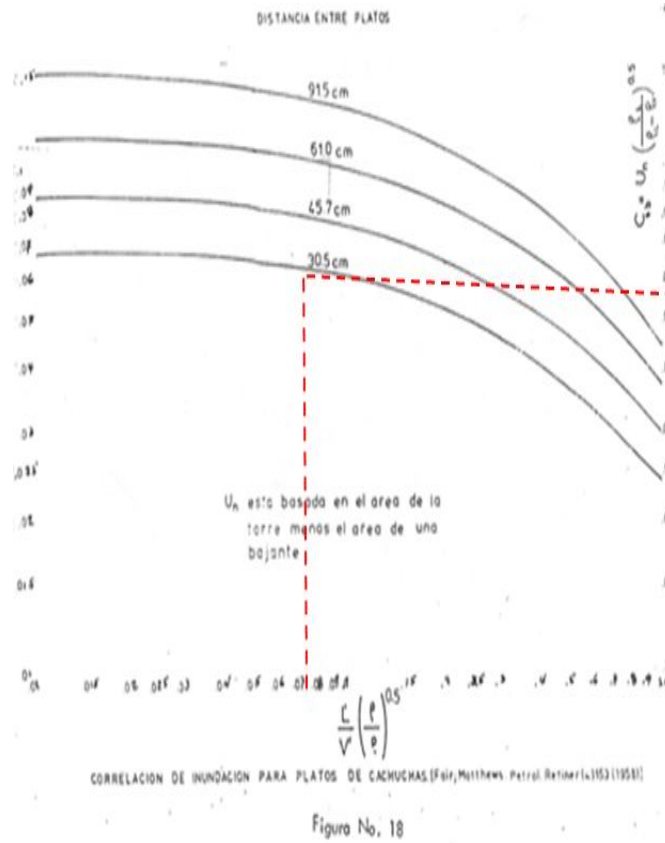


Figura No. 18

**IV**

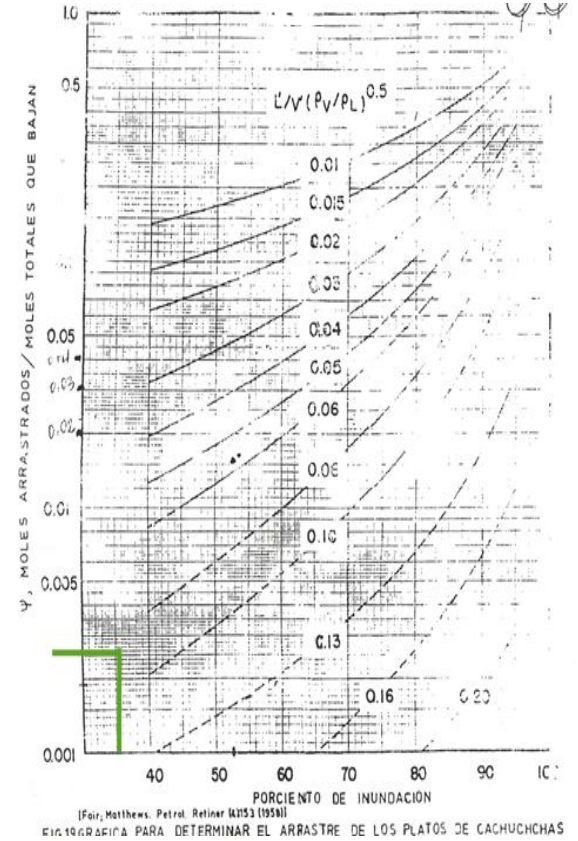


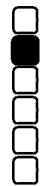
Fig. 19 GRÁFICA PARA DETERMINAR EL ARRASTRE DE LOS PLATOS DE CACHUCHAS

### NOTAS

- I:** OCONNELL, eficiencia de plato,  $E_0$ .
- II:** BROWN SOUDERS se constante,  $C$
- III:** Correlación de inundación,  $C_{sb,graf}$ .
- IV:** Diagrama determinación de arrastre,  $\phi$ .

### CATEGORÍA DEL DIAGRAMA

CERTIFICADO  
 APROBADO  
 POR APROBAR  
 POR CALIFICAR  
 POR ELIMINAR  
 INFORMACIÓN



# ESPOCH

ANDRADE HOYOS WILINGTON EDUARDO

**DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA  
 RECUPERACIÓN DE PERCLORETILENO  
 MEDIANTE EL MÉTODO DE  
 DESTILACIÓN EN INDUCALSA**

**ESCALA:**

$A_4$

**LÁMINA**

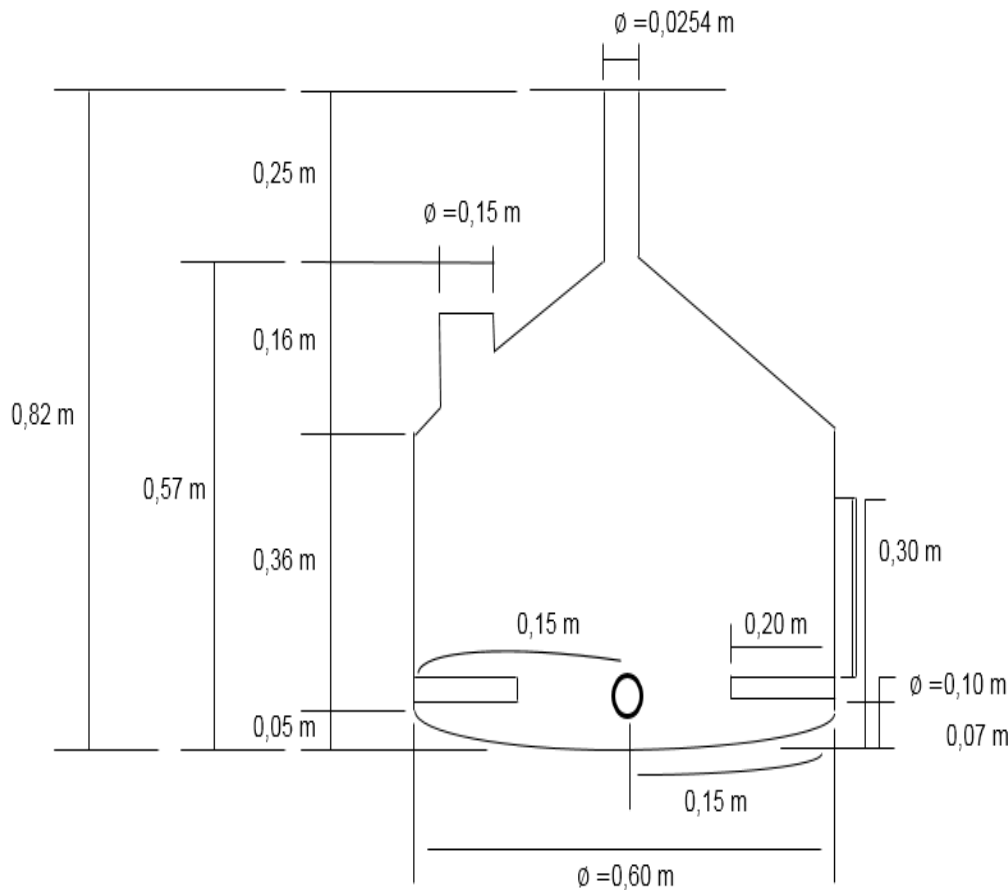
10

**FECHA**

2015/04/29

## ANEXO K DISEÑO DEL TANQUE DE EBULLICIÓN

**I**



**II**

DIMENSIONES DEL TANQUE DE EBULLICIÓN				
DETALLE	CANTIDAD	ALTURA	DIAMETRO	INDICADOR
CONO INFERIOR	1	0,05	0,60	m
CILINDRO DE TANQUE	1	0,36	0,60	m
CONO SUPERIOR	1	0,16	0,60	m
TUBERIA DE SALIDA E INGRESO	2	-	0,0254	m
TAPA	1	-	0,15	m
RESISTENCIAS ELÉCTRICAS	4	0,20	0,10	m
SEPARACION DE RESISTENCIAS	4	0,15	-	m

DIMENSIONES DE RESISTENCIAS ELÉCTRICAS					
DETALLE	CANTIDAD	LONGITUD	ALTURA	DIAMETRO	INDICADOR
RESISTENCIAS	4	0,20	-	0,10	m
COLOCACIÓN	4	-	0,07	-	m
SEPARACIÓN	4	0,15	-	-	m

**III**



### NOTAS

- I:** Grafico del tanque de ebullición.
- II:** Datos del tanque.
- III:** Diseño del tanque.

### CATEGORÍA DEL DIAGRAMA

CERTIFICADO   
 APROBADO   
 POR APROBAR   
 POR CALIFICAR   
 POR ELIMINAR   
 INFORMACIÓN

# ESPOCH

ANDRADE HOYOS WILINGTON EDUARDO

**DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA  
RECUPERACIÓN DE PERCLORETIENO  
MEDIANTE EL MÉTODO DE  
DESTILACIÓN EN INDUCALSA**

**ESCALA:**

**LÁMINA**

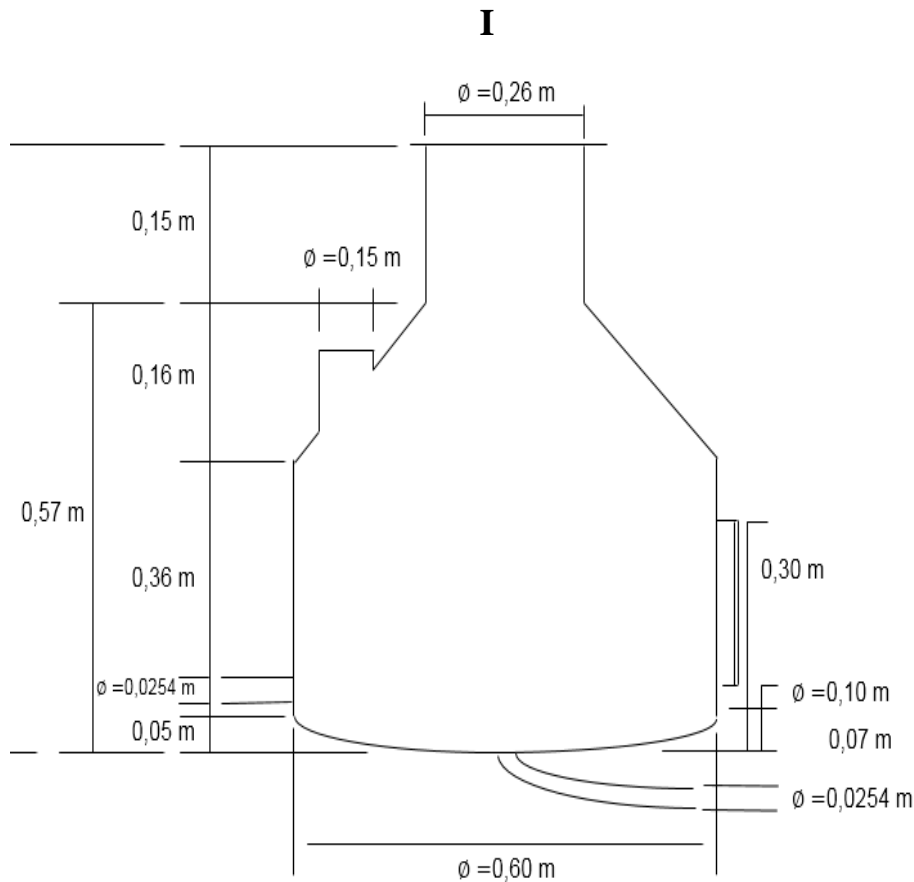
**FECHA**

A<sub>4</sub>

11

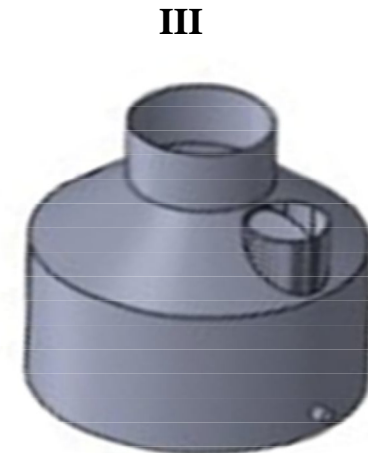
2015/04/29

## ANEXO L DISEÑO DEL TANQUE DE ALIMENTACIÓN



**II**

DIMENSIONES DEL TANQUE DE EBULLICIÓN				
DETALLE	CANTIDAD	ALTURA	DIAMETRO	INDICADOR
CONO INFERIOR	1	0,05	0,60	m
CILINDRO DE TANQUE	1	0,36	0,60	m
CONO SUPERIOR	1	0,16	0,60	m
TUBERIA DE SALIDA	2	-	0,0254	m
CILINDRO SALIENTE	1	-	0,15	m
TAPA	1	-	0,15	m



### NOTAS

- I:** Grafico del tanque de alimentación.
- II:** Datos del tanque.
- III:** Diseño del tanque.

### CATEGORÍA DEL DIAGRAMA

CERTIFICADO  
 APROBADO  
 POR APROBAR  
 POR CALIFICAR  
 POR ELIMINAR  
 INFORMACIÓN



# ESPOCH

ANDRADE HOYOS WILINGTON EDUARDO

**DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA  
 RECUPERACIÓN DE PERCLORETIENO  
 MEDIANTE EL MÉTODO DE  
 DESTILACIÓN EN INDUCALSA**

**ESCALA:**

A<sub>4</sub>

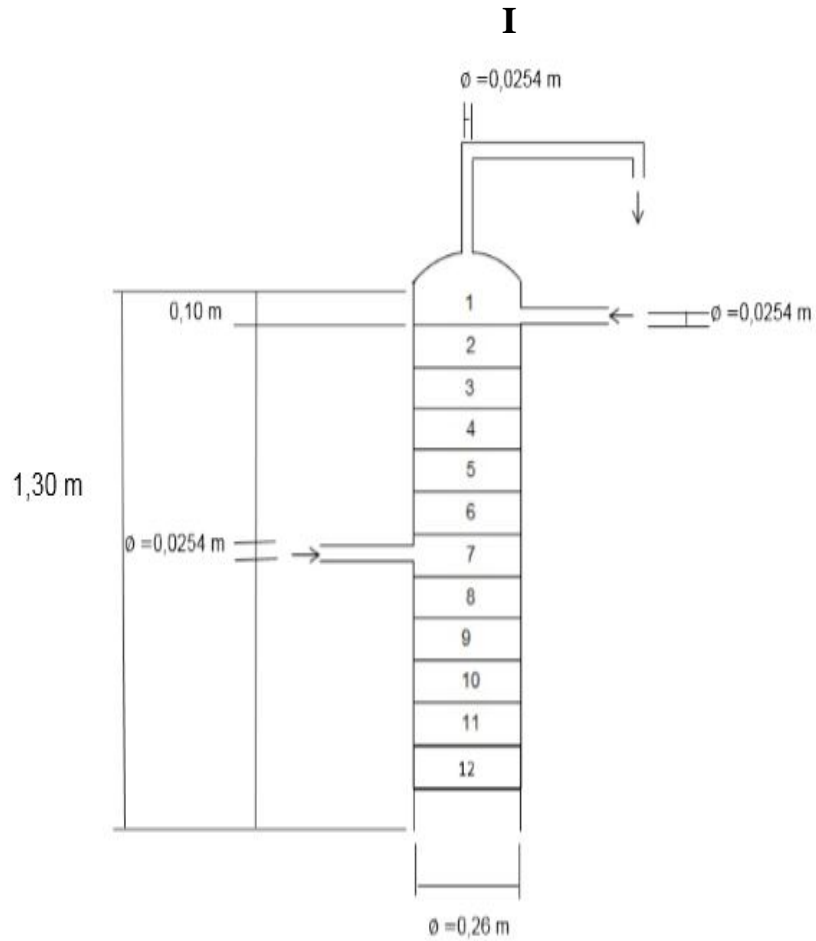
**LÁMINA**

12

**FECHA**

2015/04/29

## ANEXO M DISEÑO DE LA COLUMNA



**II**

DETALLE	MEDIDA	INDICADOR
ALTURA TOTAL DE LA COLUMNA	1,45	m
DIAMETRO DE PLATOS	0,26	m
NUMERO DE PLATOS	12	m
PLATO DE ALIMENTACIÓN	7	-
DISTANCIA ENTRE PLATOS	0,10	m
DIAMETRO DE PERFORACION DE PLATOS	0,003	m
NUMERO DE PERFORACIONES	39	-
DISTANCIA ENTRE PERFORACIONES	0,0125	m

**III**



**NOTAS**

- I:** Grafico de la columna.
- II:** Datos de la columna y platos.
- III:** Diseño de la torre.

**CATEGORÍA DEL DIAGRAMA**

- CERTIFICADO
- APROBADO
- POR APROBAR
- POR CALIFICAR
- POR ELIMINAR
- INFORMACIÓN

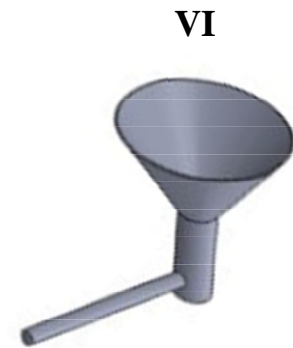
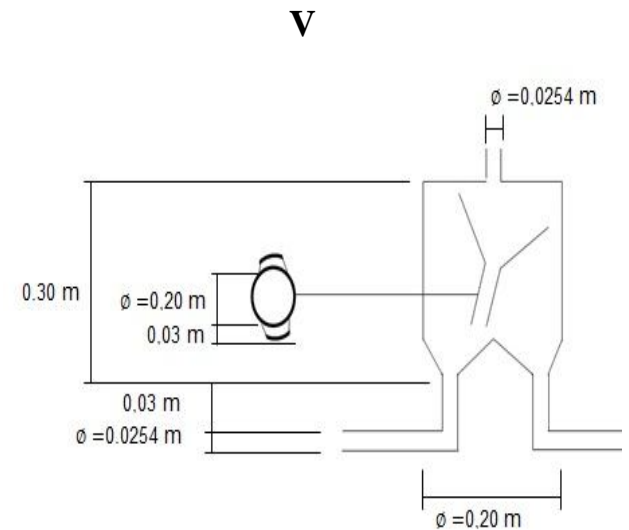
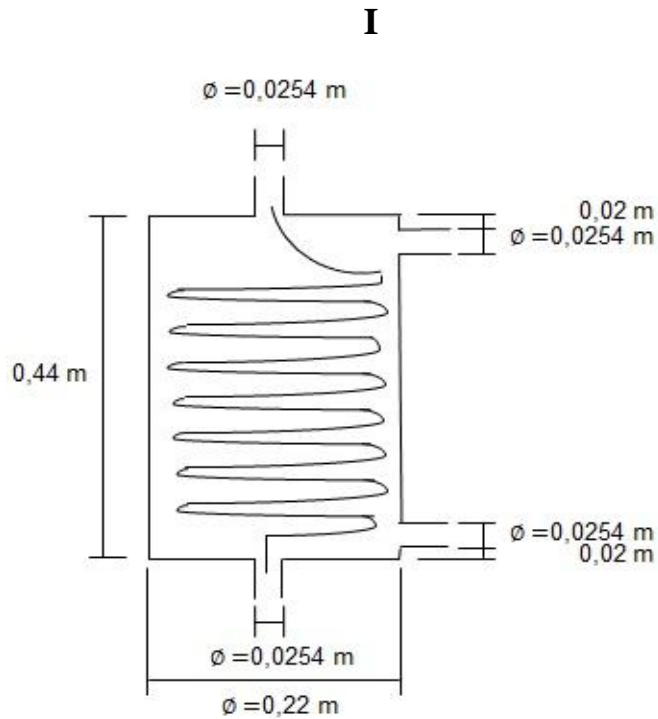
**ESPOCH**

ANDRADE HOYOS WILINGTON EDUARDO

**DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA  
RECUPERACIÓN DE PERCLORETILENO  
MEDIANTE EL MÉTODO DE  
DESTILACIÓN EN INDUCALSA**

ESCALA:	LÁMINA	FECHA
A <sub>1</sub>	13	2015/04/29

## ANEXO N DISEÑO DEL CONDENSADOR Y DISTRIBUIDOR DE CORRIENTE



**II**

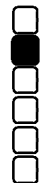
DIMENSIONES DEL CONDENSADOR					
DETALLE	CANTIDAD	LONGITUD	ALTURA	DIAMETRO	INDICADOR
CILINDRO	1	-	0,44	0,22	m
SERPENTIN TUBOS COBRE ½"	1	2	-	0,0254	m
TUBERIA	2	-	-	0,0254	m

**NOTAS**

- I:** Grafico del condensador.
- II:** Datos del condensador.
- III:** Serpentin.
- IV:** Cilindro del condensador
- V:** Grafico del distribuidor de corriente.
- VI:** Embudo del distribuidor de corriente.

**CATEGORÍA DEL DIAGRAMA**

CERTIFICADO  
 APROBADO  
 POR APROBAR  
 POR CALIFICAR  
 POR ELIMINAR  
 INFORMACIÓN



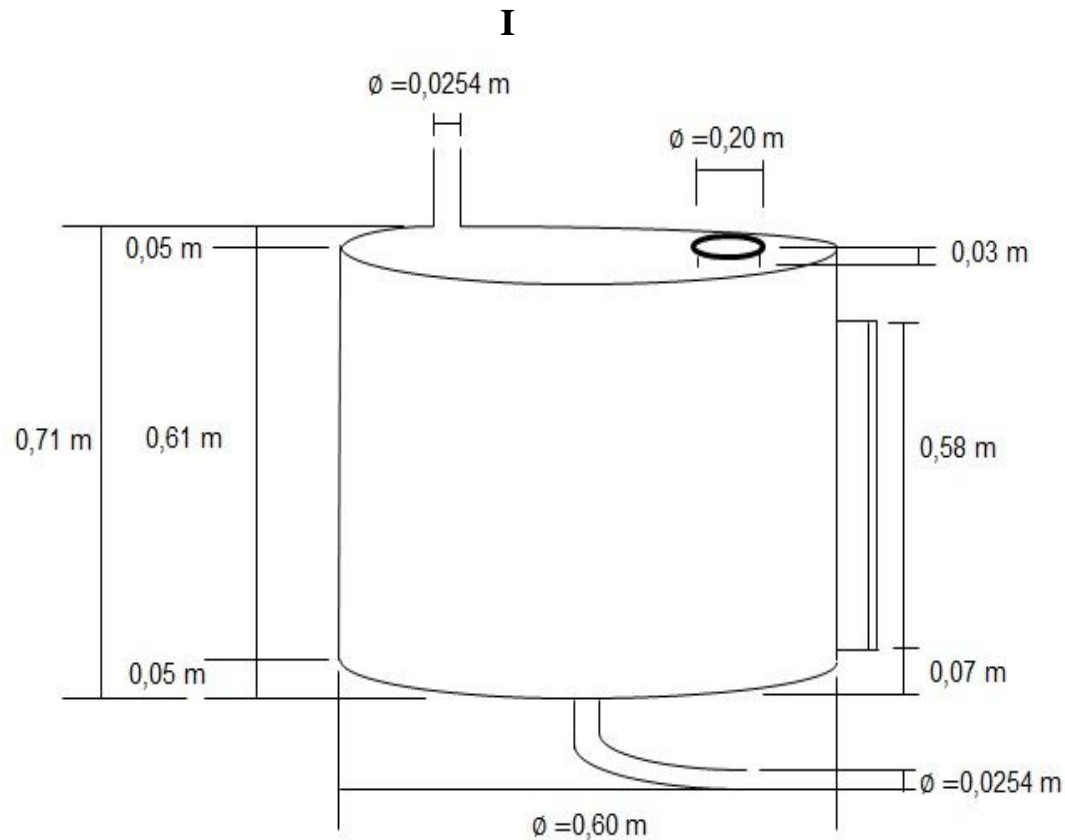
ESPOCH

ANDRADE HOYOS WILINGTON EDUARDO

DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA  
 RECUPERACIÓN DE PERCLORETIENO  
 MEDIANTE EL MÉTODO DE  
 DESTILACIÓN EN INDUCALSA

ESCALA:	LÁMINA	FECHA
A <sub>4</sub>	14	2015/04/29

## ANEXO O DISEÑO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO



**II**

DETALLE	CANTIDAD	ALTURA	DIAMETRO	INDICADOR
CONO INFERIOR	1	0,05	0,60	m
CILINDRO	1	0,61	0,60	m
CONO SUPERIOR	1	0,05	0,60	m
TAPA	1	0,003	0,20	m
NIVEL ALMACENAJE	1	0,58	-	m



### NOTAS

- I:** Grafico del tanque de almacenamiento.
- II:** Datos del tanque de almacenamiento.
- III:** Diseño del tanque.

### CATEGORÍA DEL DIAGRAMA

CERTIFICADO  
 APROBADO  
 POR APROBAR  
 POR CALIFICAR  
 POR ELIMINAR  
 INFORMACIÓN



# ESPOCH

ANDRADE HOYOS WILINGTON EDUARDO

**DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA  
 RECUPERACIÓN DE PERCLORETIENO  
 MEDIANTE EL MÉTODO DE  
 DESTILACIÓN EN INDUCALSA**

**ESCALA:**

**LÁMINA**

**FECHA**

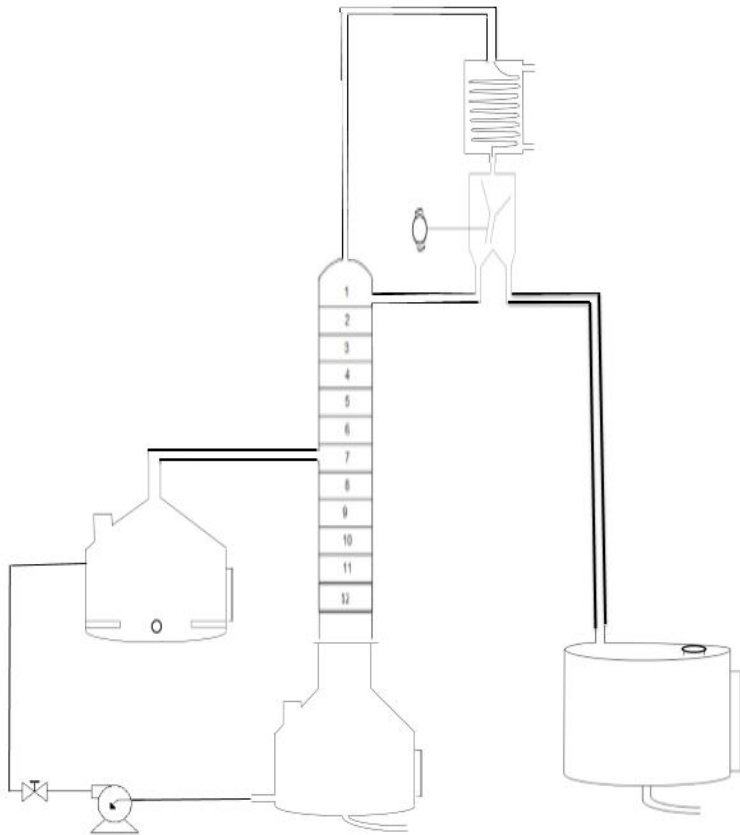
A<sub>4</sub>

15

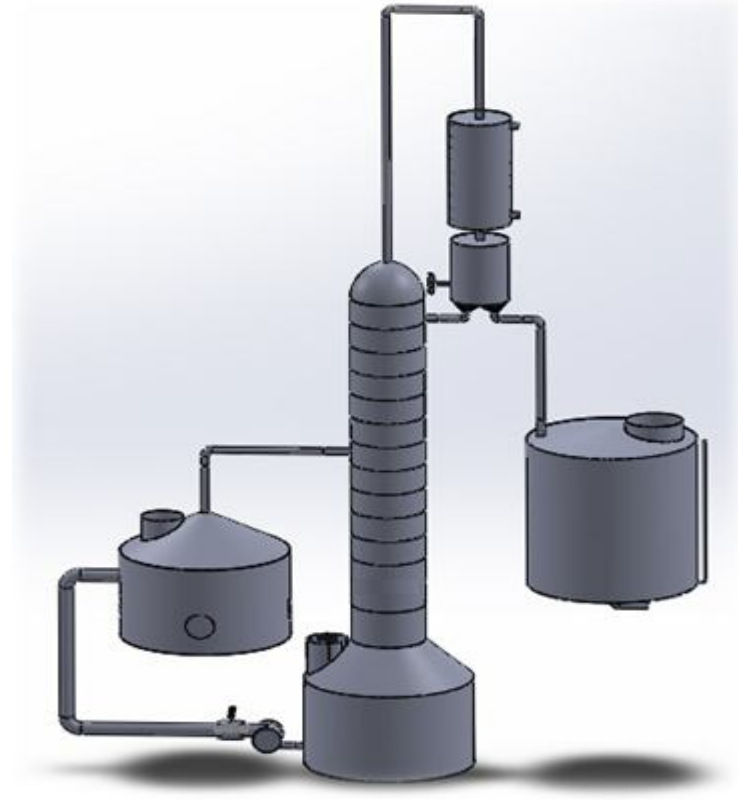
2015/04/29

## ANEXO P DISEÑO DE LA TORRE DE DESTILACIÓN

**I**



**II**



### NOTAS

**I:** Grafico de la torre de destilación.

**II:** Diseño del equipo.

### CATEGORÍA DEL DIAGRAMA

CERTIFICADO  
 APROBADO  
 POR APROBAR  
 POR CALIFICAR  
 POR ELIMINAR  
 INFORMACIÓN



# ESPOCH

ANDRADE HOYOS WILINGTON EDUARDO

**DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA  
 RECUPERACIÓN DE PERCLORETIENO  
 MEDIANTE EL MÉTODO DE  
 DESTILACIÓN EN INDUCALSA**

**ESCALA:**

A<sub>4</sub>

**LÁMINA**

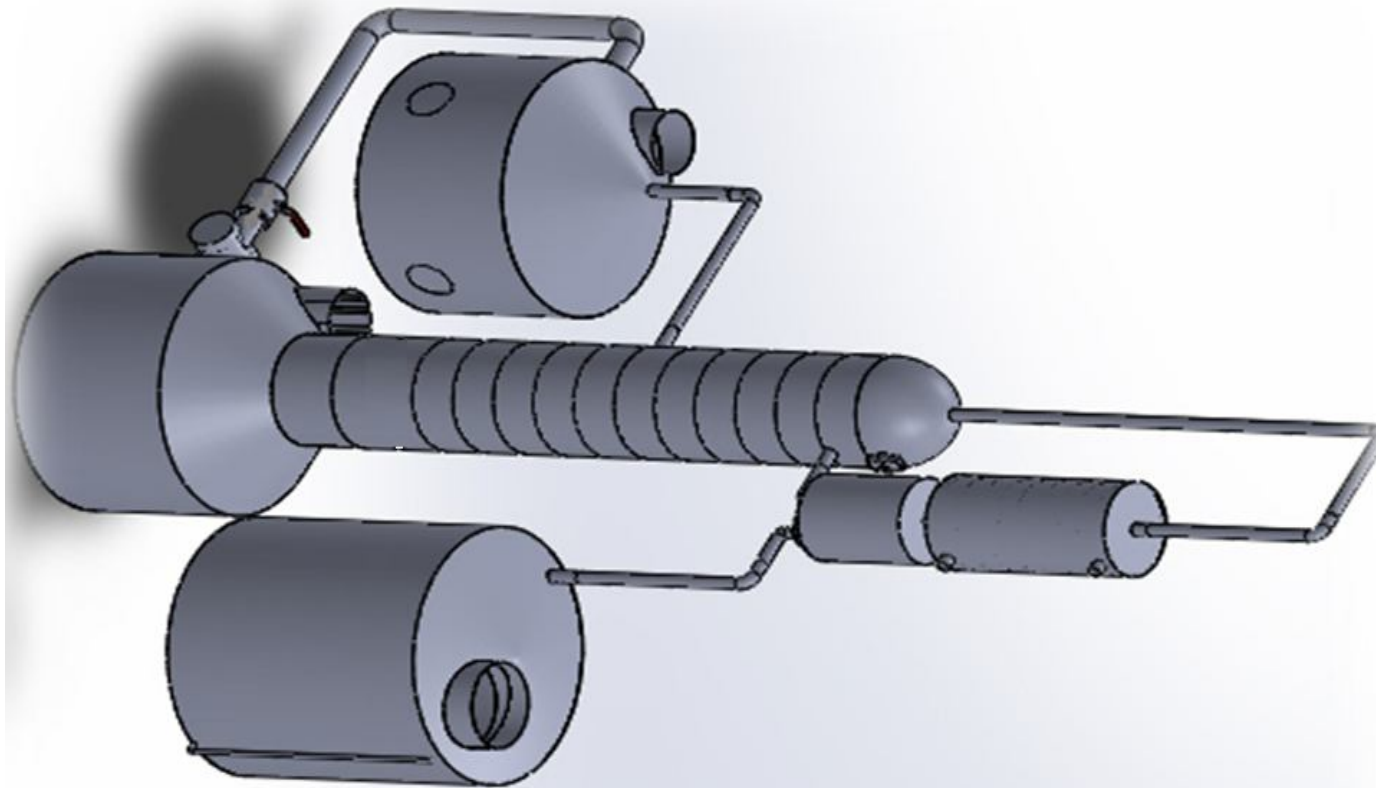
16

**FECHA**

2015/04/29

ANEXO Q DISEÑO DEL EQUIPO

I



**NOTAS**

I: Diseño del equipo de destilación.

**CATEGORÍA DEL DIAGRAMA**

CERTIFICADO   
 APROBADO   
 POR APROBAR   
 POR CALIFICAR   
 POR ELIMINAR   
 INFORMACIÓN

**ESPOCH**

ANDRADE HOYOS WILINGTON EDUARDO

**DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA  
 RECUPERACIÓN DE PERCLORETIENO  
 MEDIANTE EL MÉTODO DE  
 DESTILACIÓN EN INDUCALSA**

**ESCALA:**

A<sub>4</sub>

**LÁMINA**

17

**FECHA**

2015/04/29





**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA RECUPERACIÓN DE  
PERCLORETIENO MEDIANTE EL MÉTODO DE DESTILACIÓN EN  
INDUCALSA”**

**TESIS DE GRADO**  
Previo a la obtención del Título de:  
**INGENIERO QUÍMICO**

**AUTOR**  
**WILINGTON EDUARDO ANDRADE HOYOS**

**RIOBAMBA – ECUADOR**

**2015**