

**DISEÑO DE UNA COLUMNA DE EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO, CONSTRUCCIÓN
Y ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO**

CRISTIAN DAVID BRAVO SANCHEZ

JENNY YURLEY MALDONADO ARIAS

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL, QUÍMICA Y AMBIENTAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
PAMPLONA, ENERO DE 2017**

**DISEÑO DE UNA COLUMNA DE EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO, CONSTRUCCIÓN
Y ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO**

CRISTIAN DAVID BRAVO SANCHEZ

JENNY YURLEY MALDONADO ARIAS

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniero Químico**

Director

Dr. EDWIN GUSTAVO FUENTES ORDOÑEZ

Docente Universidad de Pamplona

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL, QUÍMICA Y AMBIENTAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
PAMPLONA, ENERO DE 2017**

DEDICATORIA

A mi madre por ser el pilar que me sostiene día a día, quien con su apoyo incondicional me ha llevado a alcanzar una meta más en la vida.

A la memoria de mi padre, ejemplo de nobleza, respeto y dedicación para trabajar por lo que soñamos.

A mi hermano, por creer en mí, y motivarme siempre.

Jenny

A Primero que todo a Dios, todo el honor y la gloria para el rey de reyes, mi bastón para levantarme. Y Jehová va delante de ti; él estará contigo, no te dejara ni te desamparará; no temas ni te intimides. Deuteronomio 31:8.

A mi madre Anayibe Sanchez porque siempre me dio la fuerza psicológica y moral cuando la necesite creyendo en mí desde que este sueño empezó, tus palabras siempre enriquecieron mi corazón.

A mi padre Mauricio Bravo por enseñarme que jamás hay que rendirse que nací para ser un ganador, la paciencia en los momentos duros y nunca dejarme solo anímicamente y económicamente.

Cristian

PENSAMIENTO

*"Together we stand, divided we fall." – Hey You.
Pink Floyd.*

AGRADECIMIENTOS

En este trabajo queremos mostrar nuestro agradecimiento a Dios y a la vida misma, por enseñarnos que siempre hay un camino para lograr nuestros propósitos, y que los obstáculos pueden ser superados con esfuerzo y dedicación.

A nuestras familias, por creer en este proyecto y financiar su ejecución de principio a fin.

Al Dr Edwin Fuentes, director del presente trabajo de grado, por habernos dado la oportunidad de trabajar a su lado. Sus exigencias y los consejos brindados fueron una motivación constante para superar nuestras propias expectativas. Gracias a sus enseñanzas y orientaciones fue posible la formulación del problema y solución de este proyecto.

A la empresa POLINDUSTRIALES de Colombia S.A.S, y a su Coordinador de Mercadeo y Ventas, Jair Sánchez, por la paciencia con que fueron atendidas nuestras solicitudes, y la calidad del producto elaborado.

Hacemos extensiva nuestra gratitud al programa de Ingeniería Química de la Universidad de Pamplona, y a todo el personal que lo conforma, en especial a la planta docente, quienes a cambio de su tiempo aportaron la formación humana y académica necesaria para nuestro desarrollo como futuros profesionales.

RESUMEN

El presente proyecto tiene como fin la realización del diseño de una columna de Extracción Líquido-Líquido y la construcción de esta misma teniendo en cuenta todos los factores que influyen en el diseño. La extracción líquido-líquido es usada cuando existen mezclas complejas que son difíciles de separar o bien, cuando existen sistemas donde la separación no se puede realizar a altas temperaturas; de esta forma surge la necesidad de que el estudiante conozca a profundidad esta operación teórica y experimentalmente para potenciar de esta manera el pensamiento crítico y creativo. Se realizó este proyecto con vista a la futura dotación y equipamiento del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la universidad con un equipo de extracción por disolvente, que permita a los estudiantes realizar futuras investigaciones y proyectos de aula en los campos de aplicación de la Ingeniería Química.

Entre los alcances que se realizaron en este trabajo está conocer detalladamente el diseño preliminar de una columna de extracción teniendo en cuenta las condiciones básicas de diseño como la selección del tipo de columna y el modo de operación de esta a escala laboratorio; además se presentó el dimensionamiento de la columna incluyendo como primera instancia el cálculo de etapas para la torre y los planos de la misma. También se realizó un diseño detallado en donde se incluyó el diagrama de flujo del proceso, los requerimientos de servicio industriales, la selección del material de construcción de la torre y los sistemas complementarios que esta necesita para su operación, como los tanques de almacenamiento de las entradas de alimentación y disolvente de extracción así como los tanques de extracto y refinado, el sistema de conducción de líquido de la torre, las bombas de alimentación del mismo, los accesorios de muestreo y la estructura de soporte de la torre, todo esto teniendo en cuenta un análisis de trabajo seguro durante la operación.

De igual forma se muestra el funcionamiento recomendado de la columna, teniendo en cuenta la elección del solvente de extracción y los cálculos teóricos y experimentales, necesarios para realizar el análisis de la operación, que permitan conocer la eficiencia de la torre y los resultados que presenta, incluyendo además el manual de operación y mantenimiento, y la guía de laboratorio para una mejor orientación al momento de manejar el equipo de extracción construido. Finalmente se realiza una simulación del proceso de extracción para observar el comportamiento de esta frente a algunos factores estipulados.

PALABRAS CLAVES

Equilibrio Líquido-Líquido; Extracción; Solvente; Simulación; Diseño.

CONTENIDO

RESUMEN.....	6
INTRODUCCIÓN.....	16
1. DESCRIPCIÓN GENERAL	18
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.2 JUSTIFICACIÓN	19
1.3 DELIMITACIÓN	20
1.3.1 <i>Objetivo General.....</i>	<i>20</i>
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	<i>21</i>
1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	21
2. MARCO TEÓRICO.....	23
2.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EXTRACCIÓN	23
2.2 APLICACIONES DE LA EXTRACCIÓN LÍQUIDA	26
2.3 EQUILIBRIO LÍQUIDO.....	28
2.4 EXTRACTORES LÍQUIDOS.....	30
2.4.1 <i>Clasificación de los equipos de extracción.....</i>	<i>31</i>
2.5 DISEÑO DE LA COLUMNA DE EXTRACCIÓN LÍQUIDA.....	39
2.6 SIMULACIÓN DE PROCESOS QUÍMICOS	40
2.6.1 <i>Simulación de procesos en Aspen Hysys v8.6</i>	<i>40</i>
3. METODOLOGÍA	42
3.1 DISEÑO DE UNA COLUMNA DE EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO.....	42
3.1.1 <i>Principios básicos de diseño.....</i>	<i>42</i>
3.1.1.1 Sistema de unidades	42
3.1.1.2 Códigos de diseño.....	42
3.1.1.3 Selección de la configuración interna del extractor	43
3.1.2 <i>Etapas de dimensionamiento de la columna de extracción líquido-líquido..</i>	<i>43</i>
3.1.2.1 Selección de la fase dispersa.	44
3.1.2.2 Diámetro de la torre.....	44
3.1.2.3 Diseño del plato.....	45
3.1.2.4 Dimensionamiento del tubo de descenso.	45
3.1.2.5 Área de dispersión.....	45
3.1.2.6 Tamaño del agujero de dispersión y distribución.	45
3.1.2.7 Espaciamiento entre cada plato.....	45
3.1.2.8 Número de platos.	46
3.1.2.9 Eficiencia del plato.....	46
3.1.2.10 Entradas de la torre.	46
3.1.3 <i>Cálculo matemático de las dimensiones de la columna</i>	<i>46</i>
3.1.3.1 Cálculo de etapas teóricas	46

3.1.3.2	Ecuaciones de diseño	49
3.1.3.3	Altura total de la columna	54
3.1.4	<i>Desarrollo y fabricación de la columna de extracción</i>	54
3.1.4.1	Selección del Material de construcción.....	54
3.1.4.2	Sistemas complementarios.....	56
3.1.5	<i>Descripción detallada del equipo de extracción líquido-líquido</i>	57
3.2	IMPLEMENTACIÓN Y DIAGNÓSTICO DEL EQUIPO DE EXTRACCIÓN	57
3.2.1	<i>Toma de muestras y cálculo de composiciones</i>	58
3.3	SIMULACIÓN DEL PROCESO	59
4.	DISEÑO DEL EQUIPO DE EXTRACCIÓN.....	61
4.1	DISEÑO PRELIMINAR DE LA COLUMNA	61
4.1.1	<i>Condiciones Básicas de Diseño</i>	62
4.1.1.1	Selección del tipo de columna usando el Método ELECTRE.....	62
4.1.2	<i>Diagrama de Bloques</i>	67
4.1.3	<i>Condiciones de operación</i>	68
4.1.3.1	Presión.....	68
4.1.3.2	Temperatura.....	68
4.2	DIMENSIONAMIENTO DE LA COLUMNA DE EXTRACCIÓN	68
4.2.1	<i>Cálculo de etapas teóricas</i>	69
4.2.2	<i>Cálculo de las dimensiones del extractor</i>	70
4.3	DISEÑO DETALLADO DE LA COLUMNA DE EXTRACCIÓN	79
4.3.1	<i>Diagrama de flujo de proceso</i>	79
4.3.2	<i>Requerimientos de servicios industriales</i>	79
4.3.2.1	Agua.....	79
4.3.2.2	Energía (Eléctrica, Térmica)	80
4.3.2.3	Manejo de Efluentes.....	80
4.3.3	<i>Selección del material a usar en la torre</i>	81
4.3.4	<i>Sistemas complementarios</i>	87
4.3.4.1	Determinación de la capacidad volumétrica del equipo de extracción .	87
4.3.5	<i>Hoja de especificaciones del equipo de extracción</i>	91
4.4	ANÁLISIS DE TRABAJO SEGURO	93
4.5	ESTIMACIÓN DE COSTOS Y PRESUPUESTO DEL PROTOTIPO.....	95
4.5.1	<i>Estimación de costos una columna comercial de extracción a escala laboratorio</i>	95
4.5.1.1	Costo de la columna de extracción (sin platos).....	96
4.5.1.2	Costo de platos perforados.....	97
4.5.1.3	Costo total del módulo principal.....	97
4.5.1.4	Costos estimados de adquisición de una columna comercial	98
5.	DIAGNÓSTICO Y ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO	101
5.1	MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	101
5.2	PRÁCTICA DE LABORATORIO DE EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO.....	107

5.3	SELECCIÓN DEL SISTEMA TERNARIO IMPLEMENTADO.....	111
5.3.1	<i>Elección del solvente</i>	111
5.4	CÁLCULOS TEÓRICOS DEL SISTEMA TERNARIO.....	115
5.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	119
5.5.1	<i>Análisis densimétrico del Sistema Ternario</i>	119
5.6	VALIDACIÓN DEL EQUIPO.....	124
5.6.1	<i>Eficiencia teórica de la extracción</i>	124
5.6.2	<i>Eficiencia experimental de la extracción</i>	124
5.6.3	<i>Rendimiento de la columna de extracción</i>	125
6.	SIMULACION DE LA COLUMNA EXTRACTIVA.....	126
6.1	PASOS PARA LA SIMULACIÓN:.....	126
	BIBLIOGRAFÍA.....	134
	ANEXOS.....	139

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Inventario del Laboratorio de Ingeniería Química.....	18
Tabla 2. Efecto de las propiedades fisicoquímicas más importantes.....	23
Tabla 3. Disolventes de extracción comúnmente utilizados.....	25
Tabla 4. Procesos industriales representativos de extracción líquido-líquido.....	27
Tabla 5. Equipos de extracción líquido-líquido.....	31
Tabla 6. Principales propiedades de los materiales considerados para la construcción del prototipo escala laboratorio de una columna de extracción.....	54
Tabla 7. Anexos para la descripción del prototipo de extracción.....	56
Tabla 8. Ventajas y desventajas de los diferentes equipos de extracción.....	62
Tabla 9. Ponderación de factores de comparación.....	63
Tabla 10. Comparación de alternativas.....	63
Tabla 11. Análisis de Importancia.....	64
Tabla 12. Matriz de concordancia.....	65
Tabla 13. Matriz de discordancia.....	65
Tabla 14. Relaciones de dominancias.....	65
Tabla 15. Servicios Industriales.....	79
Tabla 16. Ventajas y desventajas del Polimetilacrilato.....	80
Tabla 17. Ventajas y desventajas del Polipropileno.....	81
Tabla 18. Ventajas y desventajas del politetrafluoroetileno.....	82
Tabla 19. Ventajas y desventajas del vidrio Borosilicato.....	82
Tabla 20. Ventajas y desventajas del aluminio.....	83
Tabla 21. Comparación de Alternativas.....	84
Tabla 22. Ponderación de los factores de comparación.....	84
Tabla 23. Análisis de importancia.....	84
Tabla 24. Matriz de concordancia.....	85

Tabla 25. Matriz de discordancia.....	85
Tabla 26. Análisis de Dominancias.....	85
Tabla 27. Datasheet equipo de extracción líquido-líquido.....	91
Tabla 28. Análisis de riesgos.....	92
Tabla 29. Costos comerciales de los componentes del equipo.....	97
Tabla 30. Costo comercial totalizado.....	97
Tabla 31. Materia Prima e insumos.....	98
Tabla 32. Resumen de costos de Producción.....	99
Tabla 33. Costos indirectos de fabricación.....	99
Tabla 34. Riesgos químicos del solvente de extracción.....	111
Tabla 35. Evaluación cualitativa y cuantitativa de los solventes de extracción.....	112
Tabla 36. Caracterización del Alcohol Bencílico.....	113
Tabla 37. Composiciones de extracto y refinado en cada etapa de extracción.....	116
Tabla 38. Flujos máxicos (g/h) del extracto y refinado en cada etapa de equilibrio.....	117
Tabla 39. Corrientes de entrada y salida de la torre.....	117
Tabla 40. Corrientes de entrada de la columna.....	118
Tabla 41. Corrientes de salida de la columna.....	118
Tabla 42. Datos curva de calibración.....	119
Tabla 43. Datos experimentales obtenidos del ensayo de extracción.....	120

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. a) Diagrama Ternario para un par inmiscible; b) Diagrama Ternario con dos pares inmiscibles.....	28
Figura 2. Unidad de extracción líquida conectada a un sedimentador de fases...	29
Figura 3. Extracción líquida en corriente cruzada de múltiples etapas.....	30
Figura 4. Extracción por etapas de equilibrio a contracorriente.....	30
Figura 5. Esquema del mezclador-sedimentador.....	31
Figura 6. Corrientes en una columna de spray.....	31
Figura 7. Corrientes en una columna empacada.....	32
Figura 8. Flujo en una columna de Platos.....	32
Figura 9. Esquema de una columna pulsada de platos perforados.....	33
Figura 10. Diseño de una columna Scheibel.....	33
Figura 11. Esquema del contactor ORC.....	34
Figura 12. Esquema del contactor de disco giratorio.....	34
Figura 13. Esquema de una Columna Kühni.....	35
Figura 14. Esquema de una columna de platos reciprocantes.....	35
Figura 15. Extractor centrífugo.....	36
Figura 16. Esquema para la selección de extractores.....	37
Figura 17. Diagrama de flujo de las etapas de dimensionamiento de la columna...	43
Figura 18. Diagrama de equilibrio ternario Acetato de Amilo-Agua-Etanol.....	46
Figura 19. Ubicación de flujos y composiciones conocidas. (Extracción a contracorriente en etapas).....	47
Figura 20. Solución por método gráfico del número de etapas de extracción.....	48
Figura 21. Área del tubo de descenso.....	52
Figura 22. Diagrama de flujo de los sistemas auxiliares requeridos para la operación de un prototipo de extracción a escala laboratorio.....	55
Figura 23. Metodología para la puesta en marcha del equipo de extracción.....	57

Figura 24. Densímetro Portátil DENSITO 30px METTER TOLEDO.....	58
Figura 25. Metodología para la simulación de la columna de extracción en el software Aspen Plus v 8.6.....	59
Figura 26. Proceso típico de extracción líquido-líquido a escala laboratorio.....	67
Figura 27. Cálculo de etapas teóricas para el sistema estudiado.....	68
Figura 28. Especificaciones del módulo común.....	70
Figura 29. Isométrico del módulo para cada etapa.....	71
Figura 30. Especificaciones radiales de la torre.....	72
Figura 31. Especificaciones del plato perforado: a) Plano del plato en la vista superior. b) Isométrico de la pieza diseñada.....	73
Figura 32. Especificaciones de los bajantes para cada uno de los platos.....	73
Figura 33. Especificaciones del módulo de entrada de la fase continua.....	74
Figura 34. Especificaciones del módulo de entrada de la fase dispersa.....	75
Figura 35. Especificaciones del módulo de entrada de la torre.....	75
Figura 36. Especificaciones del falso plato.....	76
Figura 37. Especificaciones de las tapas para los módulos de entrada de la torre.....	76
Figura 38. Bajantes: falso plato inferior (izquierda) y falso plato superior (derecha).....	77
Figura 39. Especificaciones del bajante del último plato.....	78
Figura 40. Dimensiones de la estructura de soporte de la columna.....	90
Figura 41. Columna de extracción líquido-líquido a escala laboratorio.....	103
Figura 42. Diagrama de flujo de la extracción líquido-líquido.....	109
Figura 43. Equilibrio Ternario de los compuestos Agua-Etanol y Alcohol bencílico.....	115
Figura 44. Esquema de la extracción líquido-líquido de varias etapas a contracorriente.....	116
Figura 45. Curva de Calibración.....	119
Figura 46. Variación de la composición según la posición del plato (5 minutos)...	121

Figura 47. Variación de la composición según la posición del plato (10 minutos).....	121
Figura 48. Variación de la composición según la posición del plato (15 minutos).....	122
Figura 49. Variación de la densidad según la posición del plato.....	122
Figura 50. Selección de los compuestos.....	125
Figura 51. Selección del paquete termodinámico.....	126
Figura 52. Definición de la columna y las corrientes.....	126
Figura 53. Datos de la corriente de alimentación.....	127
Figura 54. Composiciones de la corriente de Alimentación.....	127
Figura 55. Datos de la corriente de Disolvente de extracción.....	128
Figura 56. Composiciones de la corriente de Disolvente de extracción.....	128
Figura 57. Numero de etapas en la columna.....	129
Figura 58. Valor de la presión en la columna.....	129
Figura 59. Resultados generales.....	130
Figura 60. Resultados de la composición.....	130
Figura 61. Grafica de Densidad contra Número de etapas.....	131
Figura 62. Grafica de Composiciones del extracto contra Número de etapas.....	132
Figura 63. Grafica de composiciones del refinado contra Número de etapas.....	132

LISTADO DE ANEXOS

Anexo A. Tabla para el cálculo del radio de prueba.....	138
Anexo B. Plano de las vistas del falso plato.....	140
Anexo C. Plano de las vistas del módulo común.....	141
Anexo D. Plano de las vistas del módulo de entrada.....	142
Anexo E. Plano de las vistas del plato perforado.....	143
Anexo F. Plano de las vistas de la tapa.....	144
Anexo G. Plano de las vistas del bajante común.....	145
Anexo H. Plano de las vistas del bajante del falso plato inferior.....	146
Anexo I. Plano de las vistas del bajante del falso plato superior.....	147
Anexo J. Plano de las vistas del bajante del último plato.....	148
Anexo K. Diagrama de flujo del proceso.....	149

INTRODUCCIÓN

La extracción líquido-líquido consiste en la separación de los constituyentes de una disolución líquida por contacto con otro líquido inmiscible que disuelve preferiblemente a uno de los constituyentes de la disolución original, dando lugar a la aparición de dos capas líquidas inmiscibles de diferentes densidades. La disolución a tratar se denomina alimentación, recibiendo el nombre de disolvente el líquido que se pone en contacto con ella. Después del contacto entre la alimentación y el disolvente se obtienen dos fases líquidas denominadas: extracto (la más rica en disolvente) y refinado (la más pobre en disolvente). Separando el disolvente del extracto y del refinado se obtiene el producto extraído y el producto refinado. Como lo que se pretende en la extracción es dividir la disolución líquida original en producto extraído y en producto refinado, es fundamental la separación del disolvente añadido a la disolución. De aquí que la recuperación del disolvente haya de poder efectuarse de modo sencillo y económico, generalmente se realiza por destilación o evaporación[1].

Como en el caso de los procesos de separación de absorción y destilación, las dos fases de la extracción líquido-líquido se ponen en contacto íntimo con un alto grado de turbulencia para lograr velocidades de transferencias de masa elevadas. Después de este contacto, ambas fases se separan. En la absorción y en la destilación, esta separación es rápida y fácil, debido a la gran diferencia de densidad entre la fase gaseosa (o vapor) y la líquida. En la extracción con disolvente, la diferencia de densidades entre las dos fases es muy pequeña y la separación es más complicada. Existen dos tipos principales de equipo para extracción con disolvente: recipientes equipados con agitación mecánica para el mezclado, y recipientes en los que el mezclado se obtiene por el propio flujo de los fluidos. El equipo de extracción se puede operar por lotes o en régimen continuo [2].

En los procesos de contacto líquido-líquido se usan dispositivos similares a los platos perforados de una destilación o absorción. En una torre de extracción de platos perforados, se dispersan las gotas del disolvente ligero líquido que tienden a elevarse. Las gotas dispersadas coalescen o se aglutinan debajo de cada plato y se vuelven a formar por encima de éste, al pasar a través de las perforaciones. El líquido acuoso pesado fluye hacia abajo en los platos, donde se pone en contacto con las gotas flotantes y después pasa por la bajada del plato hacia el plato inferior[2].

En problemas comunes la destilación sería la operación más adecuada para la separación, sin embargo, esta técnica es inconveniente cuando se forman mezclas azeotrópicas, o cuando el componente está presente en una proporción muy pequeña. Un estudio de esta naturaleza, es más adecuado con el comportamiento de una columna de extracción líquida de platos perforados operando bajo

condiciones que dependen de tres variables de control la concentración de la solución alimentada, el flujo del disolvente y de la alimentación y la altura de interfase, o control de nivel de las fases pesada y ligera del sistema.

Teniendo en cuenta los conceptos mencionados anteriormente y la aplicación que se puede emplear para los procesos de extracción líquido-líquido, es de vital importancia que los estudiantes de Ingeniería Química de la Universidad de Pamplona estén orientados en la expansión de conocimientos que impliquen tecnologías y equipos en el proceso de aprendizaje, con el fin de aplicar los conocimientos aprendidos el ciclo profesional, logrando una buena dinámica de estudio práctico y didáctico en un contexto real así como también observando los fenómenos físicos y químicos a nivel experimental. Por este motivo se realizó un dimensionamiento de una columna de extracción líquido-líquido a escala laboratorio con el fin de estudiar el fenómeno de extracción y validar el aprendizaje de este por medio de su operación, además de conocer la forma de validar un diseño e implementar su construcción con el fin de ser usada en los problemas de investigación que involucren este proceso.

De igual manera se hace este trabajo con el propósito de dotar el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad de Pamplona, siendo esta una de las limitaciones que afecta a los estudiantes de ingeniería química ya que aún no se cuenta con los equipos necesarios para relacionar los conocimientos teóricos con la práctica, por esta razón se piensa dejar el diseño detallado y el prototipo a escala laboratorio de una columna de extracción líquido-líquido de platos perforados para futuras investigaciones.

1.DESCRIPCIÓN GENERAL

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una de las aptitudes del perfil del Ingeniero Químico egresado de la Universidad de Pamplona es “diseñar, construir y operar plantas e instalaciones en las que se aplican los procesos químicos y bioquímicos”. Con el fin de formar ingenieros competentes en un contexto globalizado, el programa de Ingeniería Química se encuentra en un constante proceso de mejoramiento, que permita a los estudiantes su formación integral en las competencias requeridas para el ejercicio de su profesión. Entre las estrategias establecidas para tal fin, se encuentra la dotación y equipamiento del laboratorio de Operaciones Unitarias ubicado en el campus principal de la Institución, que cuenta con los equipos que se describen en la Tabla 1.

Una de las principales ramas de aplicación de la ingeniería la constituye las operaciones unitarias de separación, entre las cuáles la extracción líquido-líquido es catalogada como el segundo proceso con mayor número de aplicaciones en la industria química contemporánea, después de la destilación [3]. Por ello surge la necesidad de que el estudiante conozca a profundidad la operación, y según el enfoque dado por el programa, sea capaz de diseñar, construir y operar plantas de procesamiento químico, que normalmente incluyen la extracción líquido-líquido en alguna o varias etapas del proceso.

Tabla 1. Inventario del Laboratorio de Ingeniería Química.

N° PLACA INVENTARIO	DESCRIPCIÓN	MARCA	MODELO	OBSERVACIONES
10014356	Unidad intercambiadora de calor	Tec Quipment	TD360	
10014351	Intercambiador de calor tubos concéntricos	Tec Quipment	TD360A	Equipos de ensamble manual módulo de intercambio de calor
10014352	Intercambiador de calor de placas	Tec Quipment	TD360B	
10014353	Intercambiador de calor tubos y coraza	Tec Quipment	TD360C	
10014354	Intercambiador de recipiente encamisado con espiral y agitador	Tec Quipment	TD360D	
10014355	Versátil sistema de adquisición de datos	Tec Quipment	CB040816 04	
1002377	Evaporador doble efecto	WAYNE	P250AF DIN	Incluye la caldera, el evaporador y el tanque de almacenamiento de 500 litros

Fuente: Inventario de equipos del laboratorio de operaciones unitarias.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La extracción líquida es una de las operaciones de transferencia de masa más importantes en el campo de los procesos químicos. Existen soluciones difíciles de separar utilizando otros procesos, por ejemplo, destilación o evaporación, que en cambio pueden separarse fácilmente por la adición de un disolvente adecuado, que conlleve a la extracción de la sustancia de interés bajo condiciones de operación de fácil manipulación y control.

También hay sistemas cuya separación no es recomendable por métodos que requieran altas temperaturas, pues contienen sustancias que son sensibles a la degradación térmica. Igualmente se prefiere emplear la extracción cuando la aplicación de otro método es poco aconsejable teniendo en cuenta los altos costos económicos y la gran complejidad que presentan al ser implementados.

También es importante esta operación unitaria debido a la existencia de mezclas tan complejas en la industria, o la demanda de productos con pureza elevada, dónde

la extracción líquido-líquido es el único método adecuado para su separación. Esto puede observarse en sistemas constituidos por sustancias con propiedades muy similares como su densidad, volatilidad o peso molecular, pero de naturaleza química muy poco comparables; por esto, es posible la extracción con distintos disolventes afines a alguno de los compuestos presentes en la disolución original, que permita la recuperación del compuesto con bajos gastos económicos y consumo de reactivos, además de la eliminación de subproductos.

El estudio de la extracción por contacto con disolvente (como también es llamada esta operación), es tratado en la asignatura “Operaciones de Transferencia de Masa II” perteneciente al octavo semestre del ciclo académico, al ser una materia teórico-práctica requiere que los temas vistos sean observados experimentalmente. En un contexto más general, también se presenta la necesidad de proveer los equipos necesarios para que se puedan realizar investigaciones académicas y proyectos de aula en los campos de aplicación de la Ingeniería Química, entre los cuales es de vital importancia la comprensión y el análisis de la operación unitaria antes mencionada.

Para el proceso de enseñanza y aprendizaje es fundamental el trabajo práctico, pues contribuye a potenciar el pensamiento crítico y creativo en los estudiantes, además de la habilidad de formular ideas innovadoras a partir de problemáticas existentes, mediante el conocimiento de los equipos y procedimientos necesarios para proponer y ejecutar diferentes alternativas de solución. Puesto que el programa de Ingeniería Química no cuenta con el equipo de extracción líquido-líquido, es muy escasa la producción de trabajos académicos en este campo; las prácticas enunciadas en el contenido programático de la asignatura se deben realizar mediante montajes de laboratorio equivalentes para observar el fenómeno de extracción con disolvente, que limitan el análisis de las diferentes variables que influyen en el proceso, las cuales se podrían observar y medir claramente en un equipo diseñado específicamente para dicha operación de separación. Esta situación impide que los alumnos del ciclo profesional de la carrera, conozcan a profundidad una de las principales operaciones unitarias de la Industria de Procesos Químicos, por esta razón se debe plantear una alternativa que conduzca a la dotación de una columna para el programa de Ingeniería Química que permita analizar el fenómeno en cuestión.

1.3 DELIMITACIÓN

1.3.1 Objetivo General

- Diseñar un equipo de extracción líquido-líquido escala de laboratorio con fines académicos y analizar el comportamiento de las variables involucradas en esta operación.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Definir un tipo de columna adecuado que sea flexible a diferentes condiciones de operación y aplicable a diversos sistemas ternarios por medio del método ELECTRE.
- Construir el prototipo de la columna de acuerdo al dimensionamiento propuesto y el material más adecuado.
- Especificar los sistemas complementarios que son necesarios para la operación de la torre de extracción.
- Poner en marcha el prototipo de extracción y analizar los resultados obtenidos con un sistema ternario específico.
- Estimar los costos y el presupuesto del prototipo de extracción líquido-líquido.
- Realizar una simulación con el Software de simulación de procesos ASPEN HYSYS versión 8,6 para ver el comportamiento de una columna de extracción.

1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El presente documento se encuentra dividido en los siguientes capítulos:

Capítulo 1: Descripción general del proyecto. Se desarrollan el planteamiento del problema, la justificación de la solución planteada, el objetivo general y los específicos a cumplir con éste trabajo y la estructura del mismo.

Capítulo 2: Marco Teórico. Se define el concepto de extracción líquido-líquido y sus aplicaciones. Más adelante la clasificación de los equipos de extracción existentes en la industria, siguiendo con los parámetros generales para diseñar un equipo de extracción, finalizando con los fundamentos de la simulación de procesos químicos.

Capítulo 3: Metodología. Se describen los principios básicos de diseño, las etapas de dimensionamiento de la columna de extracción y las ecuaciones básicas para calcular estas dimensiones. Además de esto, se detalla el desarrollo y fabricación del equipo, y las pruebas experimentales desarrolladas para su implementación.

Capítulo 4: Diseño del equipo de extracción. El capítulo inicia con el diseño preliminar de la columna de extracción líquido-líquido, continúa el dimensionamiento del equipo a partir de las ecuaciones detalladas en el capítulo de Metodología. También se definen los servicios industriales y dispositivos auxiliares para el funcionamiento del equipo. A continuación se realiza un análisis de riesgos del proceso, además de mostrar la estimación de los costos que conlleva adquirir un equipo de estas características a escala laboratorio, de fuentes comerciales, para finalmente mostrar un informe de gastos con la inversión realizada para construir la columna de extracción.

Capítulo 5: Diagnóstico y Análisis de Funcionamiento. En esta unidad se enuncian las instrucciones necesarias para la operación del equipo, condensadas en el manual de operación y mantenimiento, se muestra además la guía de laboratorio para las prácticas de la asignatura Operaciones de Transferencia de Masa II; se argumenta la selección del solvente utilizado en la implementación del diseño planteado en el capítulo 4, realizando el análisis de los resultados experimentales obtenidos con el fin de calcular el rendimiento del equipo construido.

Capítulo 6: Simulación de una columna extractiva Se muestra la secuencia detallada para realizar la simulación de la operación de extracción por disolvente utilizando el software Aspen Hysys 8.6. Además se muestra el cambio de propiedades químicas (densidad y composición), en cada etapa de equilibrio.

Al finalizar el contenido principal, se presentan las conclusiones sobre la información y desempeño obtenidos a lo largo de éste proyecto, basadas en los resultados finales.

Como información adicional, en el apéndice se puede encontrar los planos elaborados a partir de las dimensiones calculadas para las piezas del equipo.

2.MARCO TEÓRICO

La operación de separación denominada como extracción líquida, llamada algunas veces extracción con disolventes, consiste en el contacto directo de dos fases líquidas inmiscibles entre las cuales se transporta y distribuye un soluto provocando la separación del mismo con respecto a la mezcla líquida original[4]. Si las sustancias que componen la solución original se distribuyen de manera distinta entre las dos fases líquidas, se puede lograr cierto grado de separación, que puede incrementarse mediante el uso de contactos múltiples.

En todas las operaciones de este tipo, la solución que se va a extraer se llama *alimentación y disolvente* el líquido con el cual se pone en contacto la alimentación. El producto de la operación rico en disolvente se llama *extracto*; el líquido residual de donde se separó el soluto es el *refinado*[5].

2.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EXTRACCIÓN

Se deben tener en cuenta algunos aspectos técnico-operativos para definir los parámetros de la operación, la composición de la alimentación, la elección del disolvente, el grado de separación deseado y la velocidad de flujo.

También es importante aclarar que la temperatura no favorece a la inmiscibilidad de los líquidos; en esta operación se recurre a la evaluación del grado de dispersión de uno de los líquidos (fase discontinua o dispersa) hacia el interior del otro líquido inmiscible (fase continua), la cual se obtiene por el grado de turbulencia o hidrodinámica del sistema, tal que a mayor dispersión se tendrá mayor área interfacial entre los líquidos, con altas turbulencias que incrementan los coeficientes de transferencia de masa y su separación efectiva[4].

Para que se lleve a cabo la extracción selectiva de cierto componente presente en una mezcla disuelta en un determinado disolvente, se puede añadir otro disolvente teniendo en cuenta las siguientes condiciones[6]. El disolvente añadido debe tener afinidad con el soluto que se va a extraer, pero ser insoluble en el disolvente de la mezcla alimentada (Por ej. Agua-Disolvente Orgánico); el líquido residual que

constituye el refinado no debe tener ninguna capacidad de mezclarse con el extracto; que sea volátil, para facilitar la recuperación posterior del soluto retirado de la alimentación; que no sea inflamable y de baja toxicidad.

Tabla 2. Efecto de las propiedades fisicoquímicas más importantes.

PROPIEDAD FÍSICO-QUÍMICA	INFLUENCIA EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN
Selectividad	Esta es la primera propiedad que se estudia para decidir la aplicabilidad de un disolvente. Es la efectividad de un disolvente para extraer un componente en una solución, el mejor disolvente es aquel que disuelve un máximo de un componente y un mínimo del otro.
Capacidad	Si el disolvente tiene capacidad para disolver grandes cantidades de soluto, el uso será probablemente antieconómico por las grandes cantidades de disolventes que circulan por la extracción.
Insolubilidad del disolvente	Cuanto mayor sea la insolubilidad del disolvente y del componente mayoritario del refinado, que no se desea extraer, más fácil será la operación de extracción.
Recuperabilidad	Todo proceso de extracción líquido-líquido es necesario separar de los productos el disolvente de extracción con varios fines entre ellos está la reutilización, también para evitar la contaminación de los productos terminados, es importante que el disolvente no forme azeótropos con los componentes que participan en el sistema y que las sustancias que se encuentran en menor cantidad sean las más volátiles.
Densidad	Es de vital importancia que exista una diferencia de las densidades en las fases de equilibrio que se ponen en contacto, ya que esto ayuda a que la velocidad de separación de las capas sea mayor.
Tensión interfacial	Cuando mayor sea la tensión interfacial entre las fases inmiscibles que han de separarse, producirá mayor coalescencia, esta exige gran energía mecánica para una mayor dispersión.
Reactividad química	Los disolventes deben tener una estabilidad química para que no se den productos extraños en el proceso, ya que esto aumenta el proceso de recuperación del disolvente, por esto se busca una reacción química que aumente el coeficiente de distribución del soluto y que el disolvente sea estable en presencia de la solución que se trata.

Fuente: Seader, J.D. and E.J. Henley, Separation process principles. 2011; Alva García, P., Tipos de contacto en la extracción líquido-líquido. 2013.

Tabla 2. (Continuación)

PROPIEDAD FÍSICO-QUÍMICA	INFLUENCIA EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN
Corrosión	El disolvente no debe causar problemas de corrosión en los materiales del equipo a fin de reducir costos de este, aunque últimamente la disponibilidad de materiales a bajo costo ha hecho que se construya plantas de extracción completas.
Viscosidad	Son secuelas de baja viscosidad la rápida sedimentación de dispersión, altas velocidades de transferencia de masa y de calor, rápida extracción y baja demanda de energía para bombeo, siendo una propiedad que se buscan en los disolventes más usados en el proceso de extracción.
Presión de vapor	En el proceso de extracción se desea un disolvente de presión de vapor bajo buscando la presión atmosférica, se pueden hacer excepciones respecto a la presión a fin de recuperar fácilmente el disolvente.
Coefficiente de Distribución	Se define como $k_i = y_i/x_i$, este coeficiente puede alterarse frecuentemente cuando cambia el pH del soluto extraído de la solución, el cambio de pH ayuda en gran manera para obtener un coeficiente de distribución favorable.
Punto de congelación	El disolvente debe tener un punto de congelación bajo para poder almacenarlo y manejarlo a la temperatura del aire libre.
Inflamabilidad	Se desea baja inflamabilidad por razones de seguridad, se usa el punto de inflamación como indicador numérico.

Fuente: Seader, J.D. and E.J. Henley, *Separation process principles*. 2011; Alva García, P., *Tipos de contacto en la extracción líquido-líquido*. 2013.

Para que el proceso de extracción sea exitoso se necesita elegir el disolvente adecuado para una mejor separación, existen varios parámetros que sirven como guía para la selección del disolvente. Uno de estos es la polaridad de la sustancia, se prefiere que tengan polaridad baja, pues si su polaridad es alta son inmiscibles en agua. En la Tabla 2 se muestran una serie de características fisicoquímicas que influyen en la selección del disolvente.

En la elección del solvente de extracción debe enfatizarse adicionalmente dos aspectos fundamentales:

1. La inmiscibilidad que debe presentar el disolvente líquido con respecto a la mezcla líquida a tratarse, de tal manera que el disolvente líquido pueda actuar sobre la mezcla líquida sin miscibilizarse, promoviendo la transferencia de masa interfacial en la mezcla bifásica, de acuerdo al grado de dispersión de uno de los líquidos sobre el otro.

2. La diferencia de densidades que debe existir entre ambas fases líquidas, tal que al finalizar la dispersión y transferencia de masa en la extracción líquida, se pueda proseguir con la separación mecánica de fases a través de los decantadores líquidos, tal que se pueda promover la coalescencia y separación de fases gracias a su diferencia de densidades.

En la Tabla 3 se mencionan algunos solventes empleados en los procesos de extracción, clasificados con respecto a la densidad del agua[7]. En el campo técnico la diferencia de densidades permite identificar a la *fase pesada* y a la *fase liviana* del proceso para fines de inyección y operación en columnas continuas.

Tabla 3. Disolventes de extracción comúnmente utilizados.

Nombre	Fórmula	Densidad (g/ml)	Punto de Ebullición (°C)	Peligrosidad
Disolventes de extracción menos densos que el agua				
Éter dietílico	$(\text{CH}_3\text{CH}_2)_2\text{O}$	0.7	35	Muy Inflamable, Tóxico
Hexano	C_6H_{14}	≈ 0.7	>60	Inflamable
Benceno	C_6H_6	0.9	80	Inflamable, Tóxico, Cancerígeno
Tolueno	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$	0.9	111	Inflamable
Acetato de Etilo	$\text{CH}_3\text{COOCH}_2\text{CH}_3$	0.9	78	Inflamable, Irritante
Disolventes de extracción más densos que el agua				
Diclorometano	CH_2Cl_2	1.3	41	Tóxico
Cloroformo	CHCl_3	1.5	61	Tóxico
Tetracloruro de carbono	CCl_4	1.6	77	Tóxico

Fuente: Extracción Líquido-Líquido.

http://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/extraccio_tip.html.

2.2 APLICACIONES DE LA EXTRACCIÓN LÍQUIDA

La extracción líquido-líquido tiene la gran ventaja de operarse directamente a la temperatura ambiente de los líquidos; por lo tanto, es una alternativa para aquellas mezclas termosensibles, en las que el calor afecta o degrada a sus componentes, también es una alternativa de separación para el caso de mezclas líquidas cuyos componentes tengan baja volatilidad o volatilidades muy cercanas entre sí que imposibilitan su separación por destilación, y en aquellos casos en los que los costos de energía térmica son altos, como suceden en las soluciones diluidas que imposibilitan la destilación ordinaria[4].

Las aplicaciones de la extracción líquida se pueden clasificar en varias categorías: aquellas aplicaciones en que la extracción está en competencia directa con otros métodos de separación y aquellas aplicaciones en que es el único método adecuado.

1. En competencia con otras operaciones de transferencia de masa: Al momento de definir la operación más adecuada para separar un componente de interés de una mezcla homogénea, se debe prestar especial atención a los costos relativos de su implementación. Si se tienen soluciones muy diluidas donde se requiere la eliminación de agua por destilación, la extracción es una alternativa más económica, principalmente, porque los disolventes orgánicos más comúnmente usados, poseen un calor de evaporación sustancialmente menor que el del agua y esta condición dificulta la operación.
2. Como un sustituto de métodos químicos: Estos métodos muchas veces requieren de otros procesos para la eliminación de los subproductos generados en la separación, además, consumen reactivos complejos y de cuidadosa manipulación. Un ejemplo de esto es la separación de metales, los cuáles se pueden purificar de manera más económica mediante extracción líquida[4].
3. En separaciones donde es el único método adecuado: La destilación y evaporación permiten obtener sustancias con alto grado de pureza pues son considerados métodos directos de separación. Sin embargo, existen soluciones que forman mezclas azeotrópicas, también aquellas donde el compuesto de interés tiene una volatilidad muy baja o punto de ebullición cercano al de otros componentes[8]. Para estos casos la destilación es un proceso inadecuado y con rendimientos bajos de producción; la extracción líquida permite la separación por afinidad química si se selecciona el disolvente correcto, produciendo nuevas soluciones que son separadas fácilmente mediante destilación simple en etapas posteriores.

La extracción líquido-líquido se aplica industrialmente en gran variedad de procesos industriales como la obtención metales, la industria alimentaria y la desulfuración de productos petrolíferos. Es utilizada en la fabricación de productos farmacéuticos como la penicilina, separación de compuestos no saturados en aceites vegetales; extracción de fenol en aceites ligeros[4]. También se aplica para separaciones de metales como vanadio-uranio, hafmio-zirconio, tungsteno-molibdeno, o purificación de productos inorgánicos tales como el ácido fosfórico, ácido bórico, o hidróxido sódico; la separación de hidrocarburos aromáticos y parafínicos por extracción con disolventes como el dióxido de azufre y el dietilenglicol o sulfolano es relativamente sencilla por este método[5].

2.3 EQUILIBRIO LÍQUIDO

La extracción líquido se presenta generalmente como un sistema de tres líquidos, con un par parcialmente soluble, en donde uno o dos de los componentes aparecen en cierta medida en las dos fases de la mezcla.

Tabla 4. Procesos industriales representativos de extracción líquido-líquido.

SOLUTO	DISOLVENTE PORTADOR	DISOLVENTE
Ácido Acético	Agua	Acetato de etilo
Ácido Acético	Agua	Acetato de isopropilo
Amoníaco	Buteno	Agua
Aromáticos	Parafinas	Dietilenglicol
Aromáticos	Parafinas	Dióxido de Azufre
Ácido Benzóico	Agua	Benceno
Formaldehído	Agua	Isopropiléter
Ácido fórmico	Agua	Tetrahidrofurano
Glicerol	Agua	Alcoholes
Metiletilcetona	Agua	Tricloroetano
Naftenos	Aceites destilados	Nitrobenceno
Naftenos/Aromáticos	Aceites destilados	Fenol
Fenol	Agua	Benceno
Cloruro de sodio	Hidróxido de Sodio (ac)	Amoníaco

Fuente: Autor

En la tabla 4 se enuncian algunos sistemas de equilibrio usados comúnmente en la industria. El estudio termodinámico del equilibrio líquido-líquido se representa cuantitativamente mediante los coeficientes de actividad de los componentes, que muestra la actividad química real de las sustancias distribuidas en las dos fases inmiscibles.

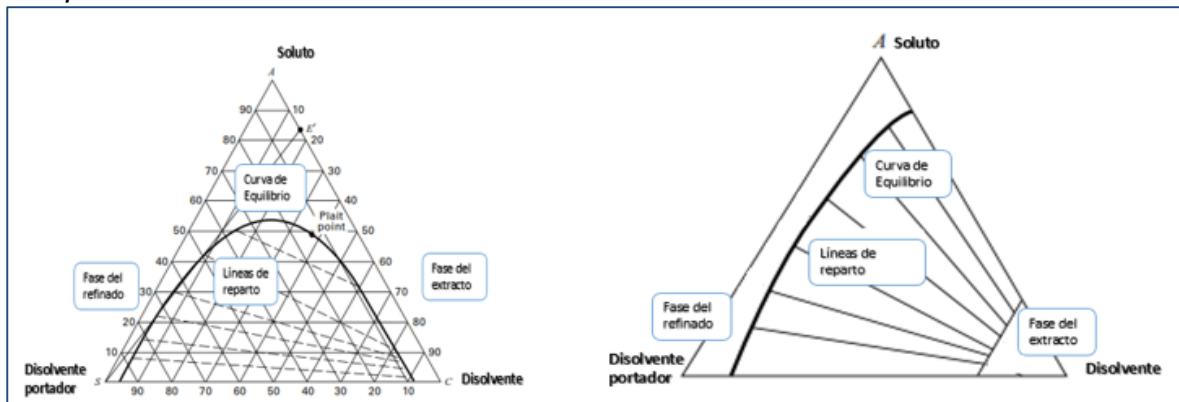
La representación del equilibrio de un sistema ternario isotérmico mediante una expresión matemática sencilla es casi imposible, es por esto que la mejor forma de representarlos es una gráfica empleando coordenadas triangulares[9].

Existen diversas opciones de representación gráfica del sistema ternario[9]:

- Triángulo equilátero.
- Triángulo rectángulo.
- Coordenadas rectangulares.

El diagrama del triángulo equilátero fue introducido por Hunter y Nash, y la posterior extensión a diagramas de rectángulo fue propuesta por [3].

Figura 1. a) Diagrama Ternario para un par inmisible; b) Diagrama Ternario con dos pares inmiscibles.



Fuente: Henley, E.J. and J.D. Seader, *Operaciones de separación por etapas de equilibrio en ingeniería química*. 1988: Reverté.

Entre estos, el más utilizado es el triángulo equilátero. En la figura 1. a) se observa el diagrama para un sistema en el que dos de los compuestos son completamente inmiscibles entre sí; para diagramas como el de la figura 1.b) el solvente S es casi totalmente insoluble en C, lo que ocasiona que S presente un alto grado de selectividad, pero esto también depende de la capacidad del solvente. En cada vértice se ubica el componente puro, normalmente se prefiere dejar el soluto en el ángulo superior, y el disolvente de arrastre en alguno de los vértices inferiores. Los lados del triángulo representan soluciones binarias de los dos componentes de los extremos. En el interior aparece la curva binodal de equilibrio de fases conectada a través de líneas de reparto, formada por la corriente de extractos y la corriente de refinados que se interceptan en un punto crítico[6]. En el exterior de la curva se percibe una única fase líquida en la que la miscibilidad de los componentes es total, mientras que en su interior coexisten las dos fases en equilibrio, que pueden ser separadas por decantación.

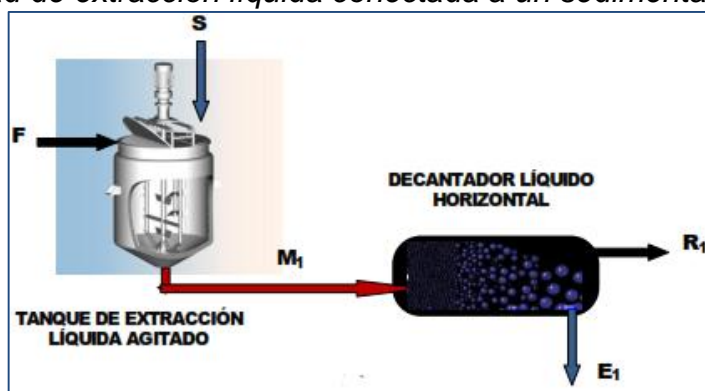
2.4 EXTRACTORES LÍQUIDOS

Las operaciones de extracción líquido-líquido se llevan a cabo generalmente en columnas. Debido a que los componentes se encuentran en una misma fase, se requiere de elementos auxiliares (agitadores, dispersores, mezcladores) que favorezcan el contacto entre los componentes del sistema, de manera tal que se alcance una mayor dispersión; si se consigue ampliar la magnitud de la superficie de contacto, se favorece el fenómeno de transferencia de masa interfacial del soluto a través de los dos líquidos inmiscibles, generando mayor eficiencia de operación.

La extracción con disolvente se puede llevar a cabo mediante diferentes esquemas de operación, entre las cuales se encuentran: extracción en una etapa, extracción en corriente cruzada y extracción en contracorriente.

La *extracción por contacto simple en una única etapa* consiste en mezclar la alimentación con el solvente de extracción por un tiempo determinado hasta que se alcance el equilibrio de fase, luego de esto la solución pasa a un decantador discontinuo para recuperar el extracto y el refinado.

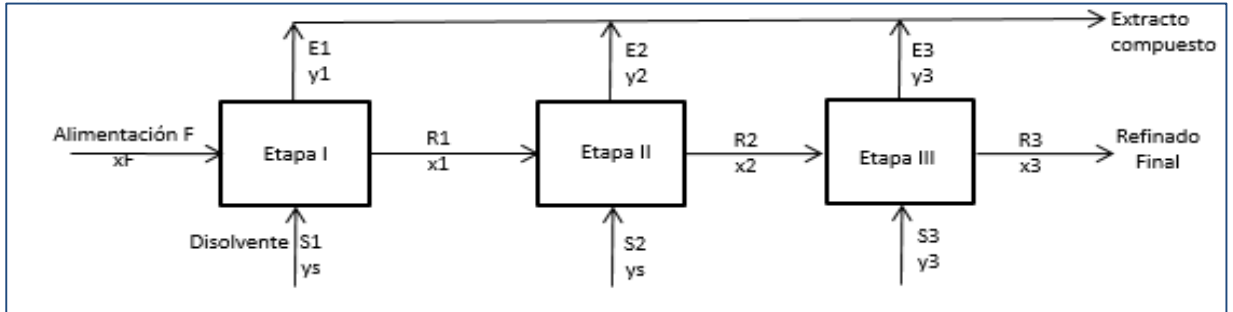
Figura 2. Unidad de extracción líquida conectada a un sedimentador de fases.



Fuente: Jara, A.A., *Fundamentos y Aplicaciones de Transferencia de Masa*. 2 ed. 2011.

La *extracción líquida en corriente cruzada* se lleva a cabo en varias etapas de separación, Su principal característica es la alimentación de solvente fresco en cada una de ellas. Se evalúa el balance de materia por componentes en cada una de ellas y se conoce la eficiencia de la operación por etapa.

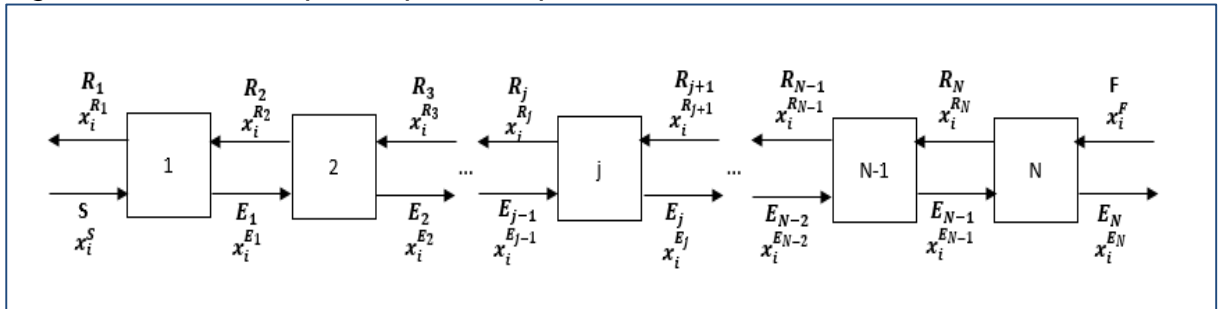
Figura 3. Extracción líquida en corriente cruzada de múltiples etapas.



Fuente: Autor

La extracción líquida en contracorriente cuenta con mayores aplicaciones industriales que las anteriormente mencionadas. En ella, el solvente circula en sentido contrario a la corriente de mezcla de la alimentación que es procesada[4].

Figura 4. Extracción por etapas de equilibrio a contracorriente.



Fuente: Autor

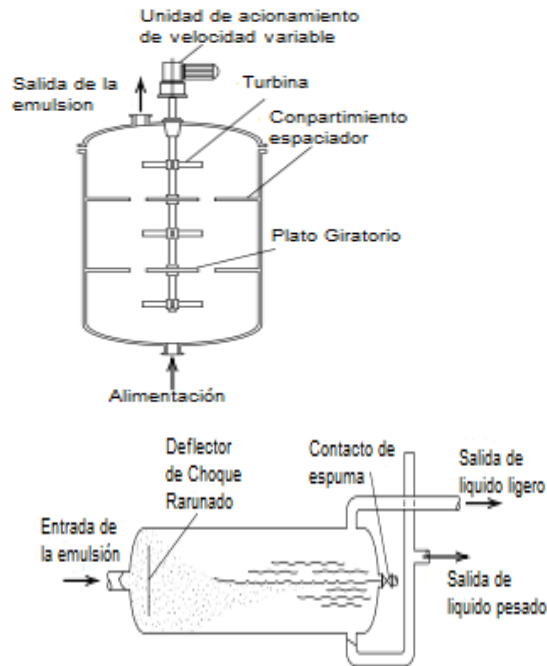
2.4.1 Clasificación de los equipos de extracción

En la Tabla 5 se presenta los tipos de equipos que existen para la extracción líquido-líquido.

Tabla 5. Equipos de extracción líquido-líquido.

MEZCLADORES-SEDIMENTADORES

Figura 5. Esquema del mezclador-sedimentador.

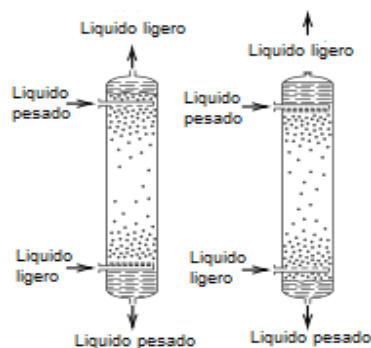


Fuente: Sleicher, C., *Entrainment and extraction efficiency of mixer-settlers*. AIChE Journal, 1960.

La forma de operación de este equipo es colocar en contacto dos fases líquidas las cuales son mezcladas en un recipiente agitado con suficiente tiempo de residencia como se muestra en la figura 5, por uno de varios tipos de impulsores (Impulsor de tipo marino, turbina centrífuga, turbina de pala, paleta de punta plana y turbina de punta plana) de modo que se vea una representación en el equilibrio, luego son separadas por sedimentación inducida por gravedad, durante la mezcla uno de los líquidos se dispersa en forma de pequeñas gotas en el otro líquido, la fase dispersa se puede comportar como la fase liviana o la fase pesada [10].

COLUMNAS DE SPRAY

Figura 6. Corrientes en una columna de spray.



Fuente:

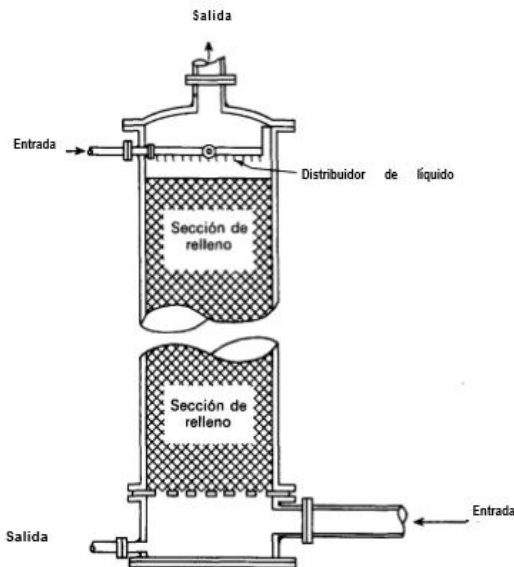
Sleicher, C., *Entrainment and extraction efficiency of mixer-settlers*. AIChE Journal, 1960.

Es el equipo de extracción más simple y más antiguos, es usada para lavados, tratamientos y neutralizaciones, una desventaja de esta columna es su bajo rendimiento de mezcla cuando está en fase continua limitando estos dispositivos en las aplicaciones donde se requiere solo una o dos etapas; en cualquier caso la fase ligera o la fase pesada se pueden dispersar, las gotas se dispersan en las entradas de las boquillas como se muestra en la figura 6 esto se debe a la diferencia de densidad y de viscosidad de los líquidos [11].

Tabla 5. (Continuación)

COLUMNAS EMPACADAS

Figura 7. Corrientes en una columna empacada.

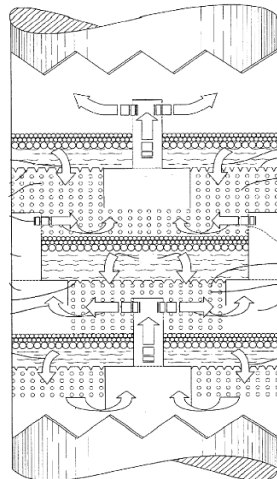


Este tipo de columnas se prefiere más que las columnas de spray ya que aumenta la coalescencia y la rotura de la gota y disminuye la mezcla axial, mejorando la transferencia de masa y aumentando el área interfacial; para este tipo de columnas se ha reportado muchos tipos de modelos de transferencia de masa hidrodinámicos respecto a los empaques, exceptuando los anillos Raschig los empaques que se usan en las columnas de destilación y absorción son adecuados para la extracción líquido-líquido. La figura 7 muestra un esquema representativo de la columna [12].

Fuente: McCabe, W.L., J.C. Smith, and P. Harriott, *Unit operations of chemical engineering. Vol. 5. 1993: McGraw-Hill New York.*

COLUMNAS DE PLATOS

Figura 8. Flujo en una columna de Platos.



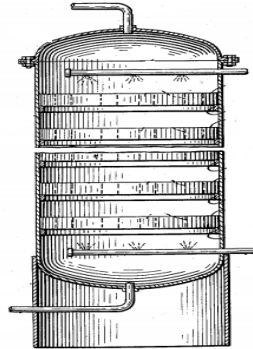
La dispersión axial iniciando el tipo de contacto por etapas, la fase dispersa se puede presentar como fase ligera o fase pesada, cuando la columna presenta la fase ligera las gotas que fluyen a través de la columna se redispersan en cada uno de los platos y la fase pesada es continua así como se muestra en la figura 8, ocurre lo contrario cuando la columna presenta la fase pesada. Las tasas de extracción en las columnas de platos son altas debido a que las gotas de la fase dispersa se fusionan y se vuelven a formar en cada plato, haciendo que se destruyan los gradientes de concentración que se desarrollan si una gota pasa a través de toda la columna sin ser interrumpida[5].

Fuente: Northup, A.H., et al., *Liquid—liquid extraction apparatus and method. 2005, Google Patents.*

Tabla 5. (Continuación)

COLUMNA DE EXTRACCIÓN PULSADA DE PLATOS PERFORADOS

Figura 9. Esquema de una columna pulsada de platos perforados.

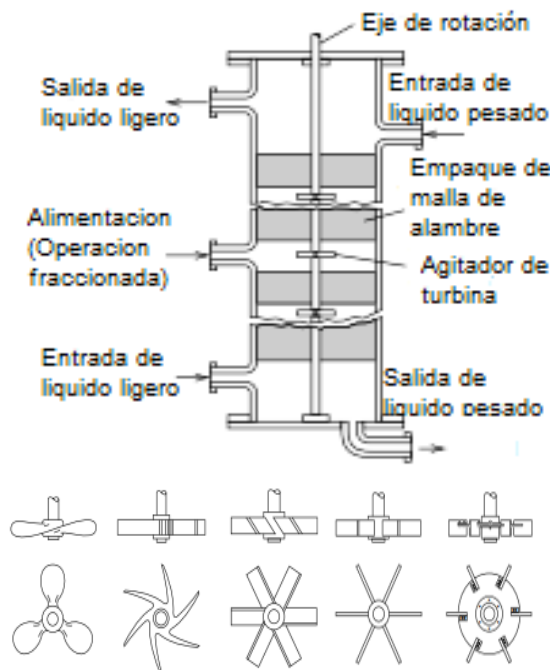


Fuente: A, B.W. and J.W. F, Plate design for pulse columns. 1953, Google Patents

Este tipo de extractor líquido-líquido encuentra aplicación principalmente en las industrias de transformación nucleares alrededor de los años 50, pero su popularidad disminuyó debido a problemas mecánicos y la falta de fiabilidad de propagación del pulso, hoy en día se usan columnas agitadas que emplean agitadores rotativos que son impulsados por un eje que se extiende axialmente a través de la columna. La figura 9 muestra el esquema representativo de la columna[13].

COLUMNA SCHEIBEL

Figura 10. Diseño de una columna Scheibel.



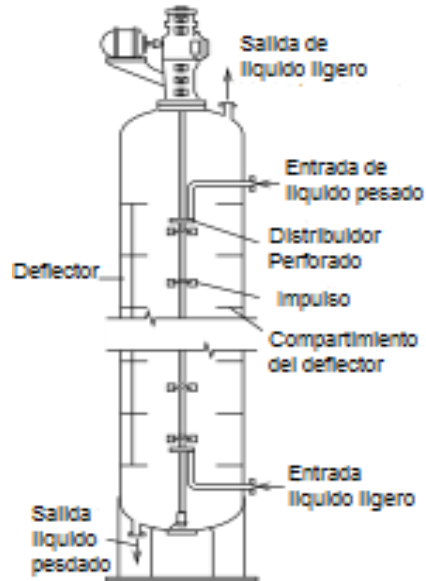
Fuente: Scheibel, E.G. and A.E. Karr, Semicommercial Multistage Extraction Column-Performance Characteristics. Industrial & Engineering Chemistry, 1950.

La columna Scheibel es una columna de etapas donde cada una consiste en una zona de mezcla y una zona de decantación, en la primera se lleva a cabo una transferencia de masa y en la segunda se produce la coalescencia; respecto a la retención que es función de la velocidad de agitación y la relación de fase muestra la predicción a diferentes alturas de la columna y con relación a la concentración de soluto se ven propiedades como la tensión superficial, la viscosidad y el coeficiente de distribución. Para su funcionamiento se ponen en contacto dos fases líquidas con agitadores de tipo turbina montados en un eje vertical, los empaques de malla de alambre impiden la retomezcla en las zonas de mezcla, este empaque es humedecido en la fase dispersa. En la figura 10 se observa el primer diseño de una columna Scheibel junto a diferentes agitadores[14].

Tabla 5. (Continuación)

CONTACTOR OLDSHUE-RUSHTON (ORC)

Figura 11. Esquema del contactor ORC.

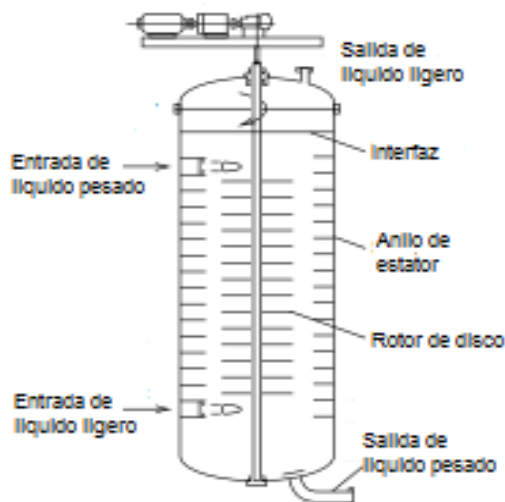


El ORC se ha usado en las industrias petroquímicas, metalúrgicas, farmacéuticas y de los fertilizantes. Consiste en una columna con una serie de compartimentos separados por discos-anillos, cada uno con cuatro deflectores, el agitador vertical montado en el centro conduce a un flujo impulsor en las turbinas. en la figura 11 se puede observar un esquema detallado de un contactor Oldshue-Rushton (ORC) [15].

Fuente: Seader, J.D. and E.J. Henley, Separation process principles. 2011.

CONTACTOR DE DISCO GIRATORIO (RDC)

Figura 12. Esquema del contactor de disco giratorio.



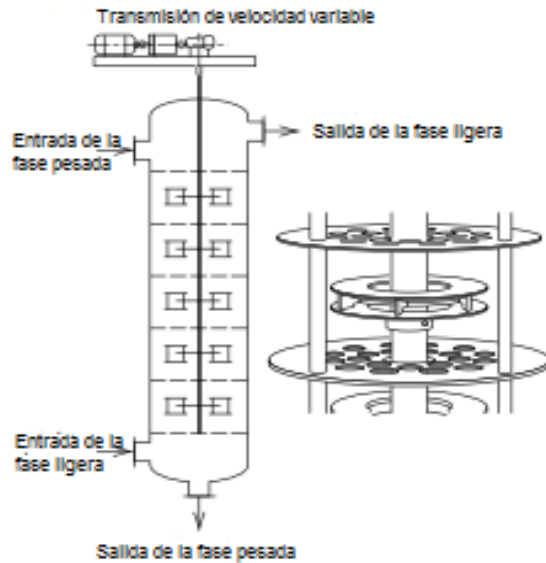
Este tipo de extractor se utiliza comúnmente para desasfaltado de petróleo, para la desulfuración de la gasolina, y para la recuperación de fenol a partir de las aguas residuales. Siendo un equipo que se usa ampliamente, este consta de discos horizontales montados sobre un eje giratorio situado en el centro así como se muestra en la figura 12, la distancia entre los discos depende del diámetro de la columna, la velocidad del rotor controla el tamaño de la gota, esta puede variar durante el proceso [14].

Fuente: Seader, J.D. and E.J. Henley, Separation process principles. 2011.

Tabla 5. (Continuación)

COLUMNA KÜHNI

Figura 13. Esquema de una Columna Kühni.

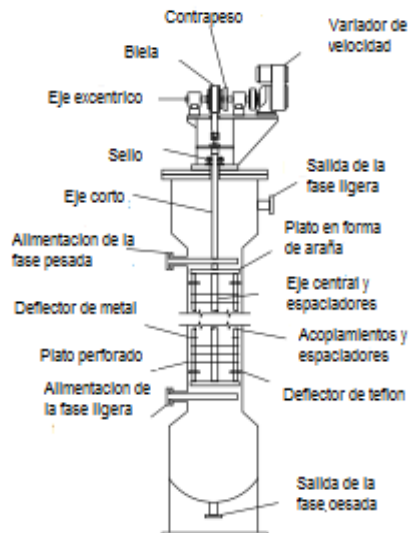


Este tipo de columna se ha utilizado para la separación de hidrocarburos aromáticos y alifáticos. Tiene un compartimiento por una serie de discos hechos de platos perforados la distancia de los discos depende del diámetro de la columna también tiene un eje central con mezcladores de turbina de flujo radial, respecto a los modelos matemáticos incluyen los modelos pseudo dinámico y modelo de la población de la gota[16]. La figura 13 muestra más detalladamente el esquema de una columna Kühni[17].

Fuente: Seader, J.D. and E.J. Henley, Separation process principles. 2011.

COLUMNA PLATOS RECIPROCANTES

Figura 14. Esquema de una columna de platos reciprocantes.



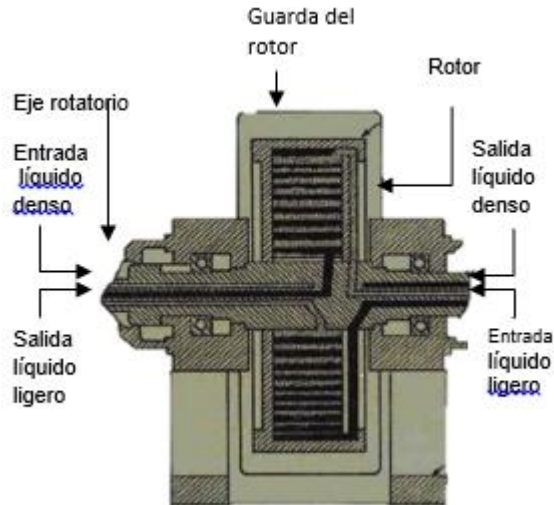
Estos tipos de extractores se utilizan en las industrias farmacéutica, petroquímica, metalúrgica y química. Presentan un movimiento alternativo, las placas de la columna se mueven de arriba abajo a una velocidad constante así como se muestra en la figura 14, usa menos energía que la columna pulsada de platos perforados, además la estrecha separación de las placas causa alta turbulencia y reduce al mínimo la mezcla axial, por lo cual se pueden ver altas tasas de transferencia de masa, como se mencionó antes la mayor utilidad para este equipo es en la bioseparación, debido a que se puede reducir el tiempo de residencia[18].

Fuente: Seader, J.D. and E.J. Henley, Separation process principles. 2011.

Tabla 5. (Continuación)

EXTRACTOR CENTRÍFUGO

Figura 15. Extractor centrífugo.

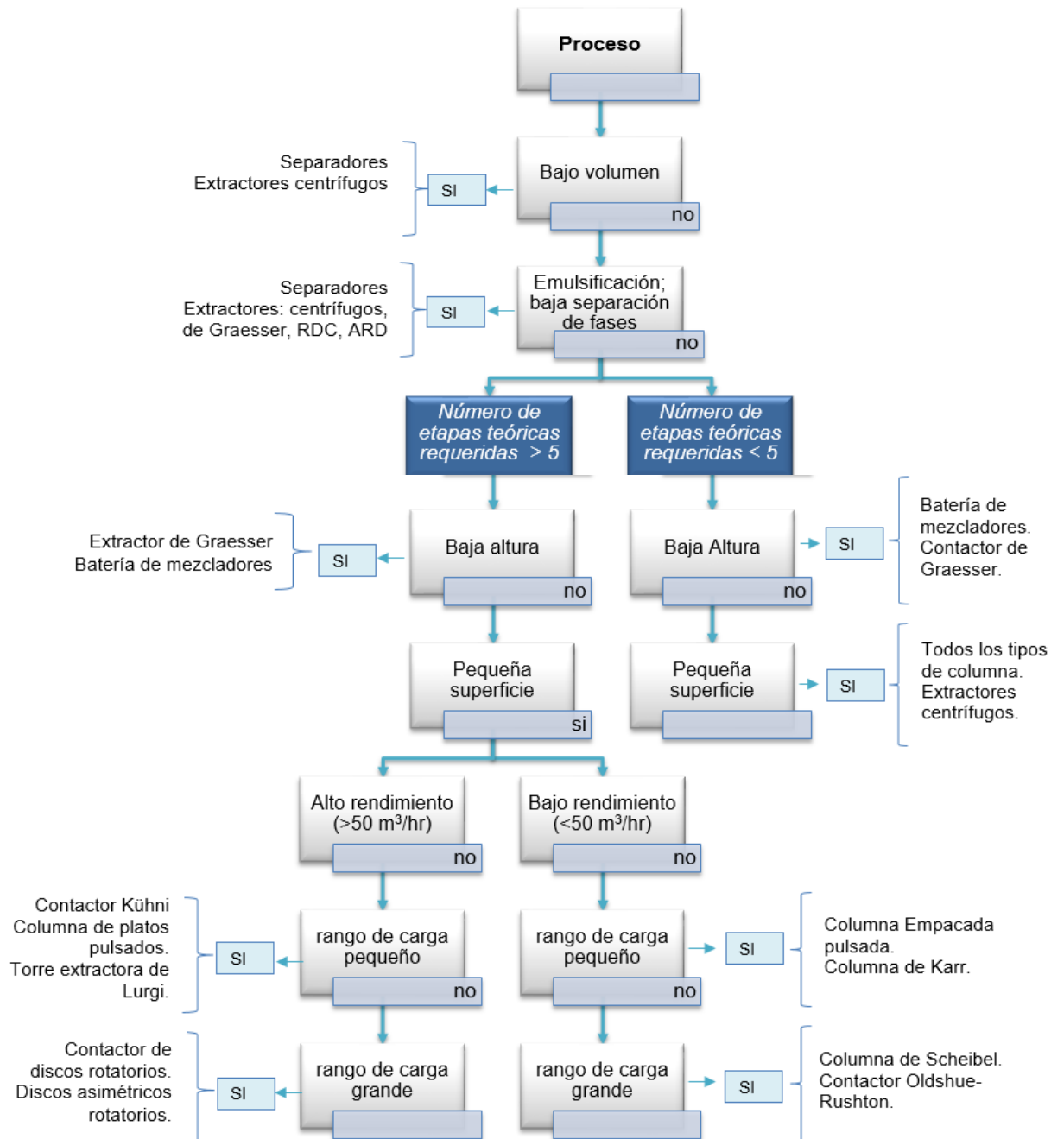


Fuente: Alva García, P., *Tipos de contacto en la extracción líquido-líquido*. 2013.

El extractor centrífugo ofrecen un pequeño volumen ocupado con altas capacidades de flujo, puesto que la sustitución de la fuerza de la gravedad por una fuerza centrífuga mucho mayor hace que esto sea posible. Estos equipos operan con ayuda de un sistema de agitación mecánica para tal fin, que gira sobre el eje horizontal. El más conocido de esta categoría es el Extractor de Podbienlniak (figura 15). Son ampliamente usados en la industria farmacéutica, pues permiten que varias máquinas sean conectadas en serie o en paralelo, con el fin de adaptarse a las condiciones de operación cambiantes y tener flexibilidad en la fabricación de diferentes productos[19].

En la figura 16 se puede observar un esquema con los criterios que se deben tener en cuenta para la selección de un equipo de extracción líquido-líquido comercial.

Figura 16. Esquema para la selección de extractores.



Fuente: Reissinger, K. and J. Schroter, Selection criteria for liquid-liquid extractors. *Chemical Engineering*, 1978. **85**(25): p. 109-118.

2.5 DISEÑO DE LA COLUMNA DE EXTRACCIÓN LÍQUIDA

Los procesos químicos son aplicados en muchos sectores de la industria, tales como productos químicos, fármacos, combustibles, polímeros, papel, alimentos, materiales, minería, extracción de metales, dispositivos electrónicos, implantes biomédicos, productos de consumo y generación de energía. Es por esto que los profesionales en Ingeniería Química están aptos abordar las necesidades que surgen en los procesos industriales, y plantear alternativas de diseño viables para conseguir el objetivo planteado inicialmente.

Entre las consideraciones que se deben tener en cuenta para diseñar una torre de extracción líquido-líquido es seleccionar la fase que se va a dispersar, comúnmente la fase que tiene mayor velocidad de flujo es la que se dispersa más rápidamente debido al mayor número de gotas, es decir, se presenta más área de contacto superficial, por lo tanto una torre de extracción de platos perforados es ideal para esta consideración.

El diámetro de la torre es otra consideración esencial para el diseño básico, puesto que este es un factor clave para evitar inundaciones. Para la selección adecuada del diámetro de la torre se tiene en cuenta el tamaño de la gota más pequeña que será separada en cada fase y el área requerida para que se presente la coalescencia de las gotas en la fase dispersa, debido a que esto puede afectar la eficiencia de la transferencia de masa en la torre, varios aspectos importantes respecto al tamaño de las gotas son los tamaños de los agujeros por los cuales fluye el líquido, la velocidad con la que fluyen las gotas y la tensión superficial. Por lo general se buscan torres de extracción con diámetros donde el tamaño de la gota sea el más pequeño, para mayor transferencia de masa cuando se están separando las fases.

Respecto a las entradas en la torre de extracción, estas están diseñadas para evadir la dispersión en la fase dispersa por debajo de las bandejas del fondo y para reducir lo más posible las perturbaciones de la separación en las zonas de salida, la fase continua se introduce en un tubo de descenso falso por encima de la bandeja superior, simulando un flujo de un tubo de descenso normal, de igual forma la fase dispersa se introduce en un falso tubo de descenso invertido por debajo de la bandeja inferior. Las zonas de salida de la torre están diseñadas para facilitar el tiempo de residencia para que se desarrolle la coalescencia en la fase dispersa y se dé el arrastre en las dos fases.

Es necesario tener establecida las necesidades que se van a satisfacer cuando se culminen todas las etapas del diseño en ingeniería. Además el ingeniero debe tener en cuenta las restricciones que limitan los resultados de su estudio.

La necesidad en particular aquí estudiada se fundamenta en la escasa dotación de equipos de laboratorio de Operaciones Unitarias de Ingeniería Química, que limitan

la observación y posterior análisis por parte de los estudiantes, de las operaciones de separación más importantes a nivel industrial, en este caso, del fenómeno de extracción por disolvente, con el fin de contribuir a la formación integral de los futuros profesionales egresados de este programa.

2.6 SIMULACIÓN DE PROCESOS QUÍMICOS

La simulación de procesos químicos es la representación de un proceso por un modelo matemático que es solucionado para obtener información acerca del comportamiento del proceso químico [20].

Los procesos químicos pueden ser simulados mediante herramientas informáticas creadas para tal fin. La predicción de propiedades en las corrientes de salida de los procesos puede aportar una ventaja competitiva en el diseño y operación de plantas químicas[21].

2.6.1 Simulación de procesos en Aspen Hysys v8.6

El software Aspen, (Advanced System for Process Engineering: Sistema Avanzado para Ingeniería de Procesos), fue creado en 1970 por un equipo de investigación del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), y ha sido comercializado desde 1980 por la compañía Aspen Tech. Entre los diversos programas del paquete *Aspen Engineering Suite*, se encuentran programas como Aspen Plus, Aspen Properties, Aspen Dynamics, entre otros [22].

El simulador Aspen Hysys además de otras tareas, permite:

- Estimar propiedades de compuestos
- Realizar el análisis de sensibilidad de las variables de proceso
- Obtener especificaciones de diseño de proceso
- Sintetizar y analizar procesos químicos
- Simular diagramas de flujo de proceso

Para la simulación de un proceso químico utilizando el software Aspen Hysys es importante definir:

- Componentes involucrados en el proceso.
- Paquete de propiedades termodinámicas. Se debe elegir un modelo apropiado que permita la simulación de equilibrios de fases complejos, para aprovechar las herramientas que trae el programa, evitando así el ajuste o estimación de los parámetros mediante otros métodos.

- Características de las corrientes de alimentación: variables como presión, temperatura, composición, y estado físico de la corriente.
- Equipos utilizados y su ubicación en el diagrama de flujo de proceso.
- Variables de operación y de diseño para cada equipo: Temperatura, presión total, presión en cabeza y fondo del equipo, eficiencia, etc.
- Características requeridas en las corrientes de productos del proceso.

La simulación de procesos químicos se constituye actualmente como uno de los principales métodos de predicción de las condiciones de operación, propiedades, flujos y composiciones de las corrientes involucradas en el proceso y el dimensionamiento de equipos. Por esto, es vital que los profesionales de Ingeniería Química conozcan y manejen herramientas tecnológicas como Aspen Hysys para el diseño, evaluación y optimización de procesos en la industria.

3. METODOLOGÍA

3.1 DISEÑO DE UNA COLUMNA DE EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO

Para el diseño de una columna de extracción líquido-líquido a escala laboratorio se deben tener en cuenta limitaciones internas y externas dadas por las aplicaciones que tendrá el equipo características del entorno educativo. Entre las limitaciones externas se pueden mencionar las normativas de seguridad de los laboratorios de la universidad, la disponibilidad de reactivos en la cantidad suficiente para llevar a cabo la operación de separación y los recursos existentes que faciliten las labores de mantenimiento del equipo para su óptimo desempeño. Además de ello, en el diseño de un equipo para un proceso químico también se presentan limitaciones internas, que ayudan a definir los diseños recomendables para atender la necesidad específica planteada inicialmente. Entre éstas se pueden mencionar las condiciones del proceso, los materiales, el tiempo, el personal disponible y la elección del proceso.

3.1.1 Principios básicos de diseño

Una vez definidas la necesidad y limitaciones del caso en estudio, es importante establecer los principios básicos del diseño, con el fin de definir las especificaciones que influirán a lo largo del proceso. A continuación se mencionan las bases del diseño establecidas para definir en forma clara el dimensionamiento de la columna.

3.1.1.1 *Sistema de unidades*

Sistema Internacional de Medidas (Metro, Kilogramo, Segundo). Las dimensiones internas de la columna son dadas en milímetros.

3.1.1.2 *Códigos de diseño*

Es importante en todo proyecto definir parámetros y características de funcionamiento sobre las cuales se basa el diseño del mismo. Existen parámetros

ya definidos en la literatura, que describen los rangos permitidos para el dimensionamiento de un equipo a escala laboratorio, y a su vez definen características básicas que se toman en cuenta para el dimensionamiento o selección de los demás elementos del equipo que permiten su operación.

El tamaño de la columna se clasifica según el diámetro del cuerpo principal. Esta medida tiene un valor entre 30 y 100 mm para los equipos construidos para extracción en escala laboratorio. Los diámetros de las columnas para experimentos en esta escala, están frecuentemente en el rango de 50 mm [23].

Generalmente, este tipo de columnas no posee dispositivos de control, o su equipamiento para esto es limitado y básico. Funcionan en operación batch, y la eficiencia de la separación no puede calcularse con exactitud.

La estructura del equipo debe ser tan similar como sea posible de una planta industrial, incluyendo todos los pasos del proceso. Las conexiones de las corrientes de entrada y salida, y los tanques de almacenamiento respectivos, deben ser definidas en el diseño, de tal manera que soporten las presiones internas generadas por los componentes del sistema ternario estudiado, además de ser resistentes químicamente a estos. En la estructura interna de la columna, los accesorios y dispositivos de conexión para las corrientes del solvente y la alimentación, deben ser diseñados de tal forma que no generen discontinuidades en el flujo circulante de una etapa a otra.

En el diseño debe tenerse en cuenta un fácil mantenimiento y limpieza, también es necesario reducir el riesgo de derrames para proteger al usuario del contacto accidental con los solventes empleados. La estructura de la base que sostiene la columna de separación, debe permitir el fácil acceso y manipulación de ésta, con el fin de simplificar su operabilidad.

3.1.1.3 *Selección de la configuración interna del extractor*

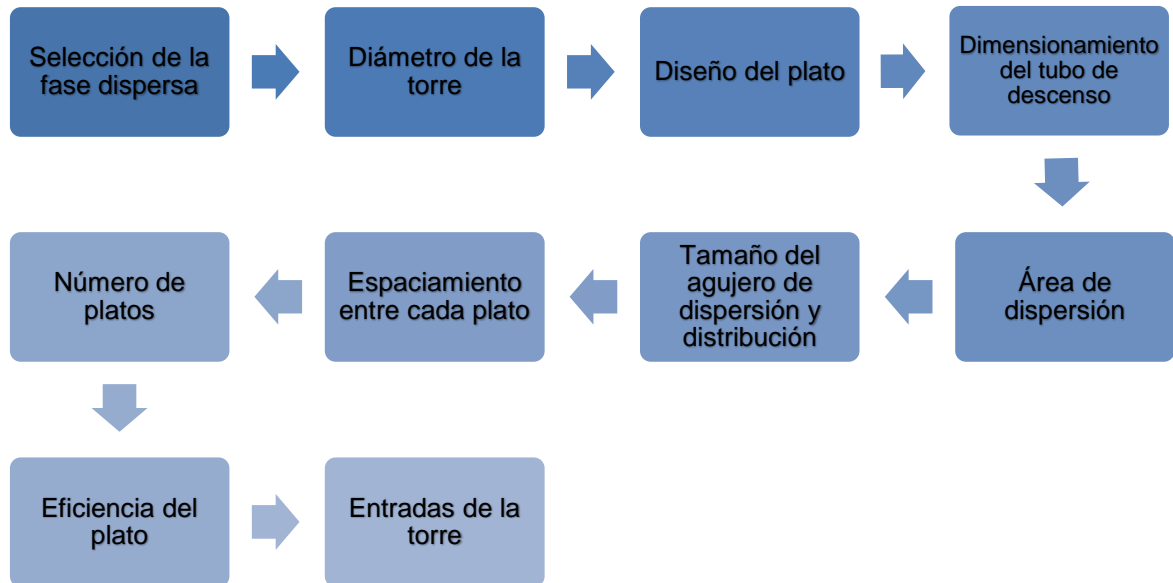
Basados en la clasificación de los equipos de extracción descrita en la tabla 5 (sección 2.4.1 del marco teórico), se compararon las características y requerimientos de diseño de cada una de estas configuraciones con el fin de seleccionar la más adecuada[24], para la construcción de un prototipo de escala laboratorio que permita observar y analizar esta operación unitaria en el entorno educativo.

3.1.2 Etapas de dimensionamiento de la columna de extracción líquido-líquido

Para el diseño y análisis del sistema se siguieron unos pasos básicos para equipos de este modelo, mostrados en la figura 17. Estos son: la selección de la fase dispersa, el diámetro de la torre, el diseño del plato, el dimensionamiento del tubo de descenso, el área de dispersión, el tamaño del agujero de dispersión y su

distribución, el espaciamiento entre cada plato, el número de platos y la eficiencia de cada plato.

Figura 17. Diagrama de flujo de las etapas de dimensionamiento de la columna.



Fuente: Autor

3.1.2.1 Selección de la fase dispersa.

Entre las consideraciones que se deben tener en cuenta para diseñar una torre de extracción líquido-líquido, una de ellas es seleccionar la fase que se va a dispersar, comúnmente la fase que tiene mayor velocidad de flujo es la que se dispersa más rápidamente debido al mayor número de gotas, es decir, tiene la posibilidad de presentar mayor área de contacto superficial, favoreciendo la transferencia de masa del soluto.

3.1.2.2 Diámetro de la torre.

El diámetro de la torre es otra consideración esencial para el diseño básico, puesto que este es un factor clave para evitar inundaciones. Para la selección adecuada del diámetro de la torre se tiene en cuenta el tamaño de la gota más pequeña que será separada en cada fase y el área requerida para que se presente la coalescencia de las gotas en la fase dispersa, debido a que esto puede afectar la eficiencia de la transferencia de masa en la torre; varios aspectos importantes respecto al tamaño de las gotas son: el tamaño de los agujeros por los cuales fluye el líquido, la velocidad de las gotas y la tensión superficial. Por lo general se buscan torres de extracción con diámetros donde el tamaño de la gota sea el más pequeño, para mayor transferencia de masa al momento de separar las fases.

3.1.2.3 *Diseño del plato*

Para el diseño de los platos se tiene en cuenta el balance, con consideraciones de transferencia de masa y separación de fases, además de algunas variaciones de diseño como los vertederos de desbordamiento y tubos descendentes; se establecen áreas de tubos de descenso para evitar restricciones de flujo, es decir, evitar altas velocidades en la fase continua.

3.1.2.4 *Dimensionamiento del tubo de descenso.*

El área del tubo de descenso se establece, como se dijo anteriormente principalmente para evitar restricciones de flujo y, por lo tanto, altas velocidades de la fase continua. Los tubos de descenso están diseñados para una velocidad lineal máxima de 46mm/s para asegurar un flujo uniforme de la fase continua a través de la bandeja; el espacio libre bajo el tubo de descenso está dimensionado para una velocidad máxima de 30 mm/s, con el fin de proporcionar una zona de reposo para la solución de la gota que permita mayor coalescencia.

3.1.2.5 *Área de dispersión.*

Los platos perforados de zona única de dispersión son los más sencillos de diseñar y construir. La capa de la fase dispersa en los platos perforados proporciona tanto el tiempo de residencia para la coalescencia como la fuerza motriz para el flujo a través de los agujeros.

3.1.2.6 *Tamaño del agujero de dispersión y distribución.*

El área de los orificios de dispersión se establece para asegurar la formación de las gotas en la fase dispersa para una mejor transferencia de masa y una buena separación de las fases, los orificios deben ser perforados en la dirección del flujo a través del agujero dejando un borde en la caída de descarga del plato, es decir en la parte superior del plato cuando se dispersa la fase ligera, teniendo en cuenta que el plato no obstruya el flujo de las fases; La disposición en el diseño del área de los agujeros debe ser muy buena tal que el contacto entre las dos evite la derivación de las gotas en el tubo de descenso, estos orificios deben estar en el lado opuesto del plato donde está el tubo de descenso a no más de 100mm.

3.1.2.7 *Espaciamiento entre cada plato.*

La separación en las bandejas debe permitir la transferencia de masa y la buena separación de las fases. Para que estos fenómenos ocurran deben existir mayores espaciamientos en los platos, tal que las gotas tengan una ruta de ascenso mayor para la transferencia de masa en cada plato y se reduzca la velocidad de flujo transversal en la fase continua.

3.1.2.8 *Número de platos.*

El número de platos usados en el extractor es generalmente equivalente al número de etapas teóricas dividido por la eficiencia global del plato. Para la eficiencia del plato se observa la transferencia de masa entre la fase dispersa y la fase continua en tres zonas distintas:

1. Transferencia de masa durante la formación de las gotas en el plato.
2. Transferencia de masa en la caída a través de la fase continua.
3. Transferencia de masa durante la coalescencia en las gotas en la interfaz del siguiente plato.

3.1.2.9 *Eficiencia del plato.*

Se puede decir que la eficiencia de los platos es una función compleja en el diseño de los mismos, afectando el tamaño de las gotas, la tensión interfacial, las viscosidades de las fases y la difusividad de los componentes.

3.1.2.10 *Entradas de la torre.*

Respecto a las entradas en la torre de extracción, estas están diseñadas para evadir la dispersión en la fase dispersa por debajo de las bandejas del fondo y para reducir lo más posible las perturbaciones de la separación en las zonas de salida. La fase continua se introduce en un tubo de descenso falso por encima de la bandeja superior, simulando un flujo de un tubo de descenso normal, de igual forma la fase dispersa se introduce en un falso tubo de descenso invertido por debajo de la bandeja inferior. Las zonas de salida de la torre están diseñadas para facilitar el tiempo de residencia, permitiendo el desarrollo de la coalescencia en la fase dispersa y el arrastre en las dos fases.

3.1.3 Cálculo matemático de las dimensiones de la columna

Para empezar con el diseño se deben calcular los balances de materia para hallar el número de etapas teóricas que se usaran en la torre, además de escoger las fases de separación, por lo general la fase dispersa siempre es la mezcla que se piensa separar y la fase continua es el solvente de separación, el diámetro de la gota, los caudales de la fase dispersa y la fase continua, la densidad de la fase dispersa y la fase continua y la viscosidad de la fase dispersa y la fase continua.

3.1.3.1 *Cálculo de etapas teóricas.*

Al conocer la altura de cada etapa de equilibrio en la extracción, se facilitan los cálculos de la altura total si se calcula el número de etapas teóricas requeridas para que se lleve a cabo la separación, utilizando el método gráfico sobre un diagrama triangulas equilátero. El equilibrio líquido-líquido para el sistema ternario agua-

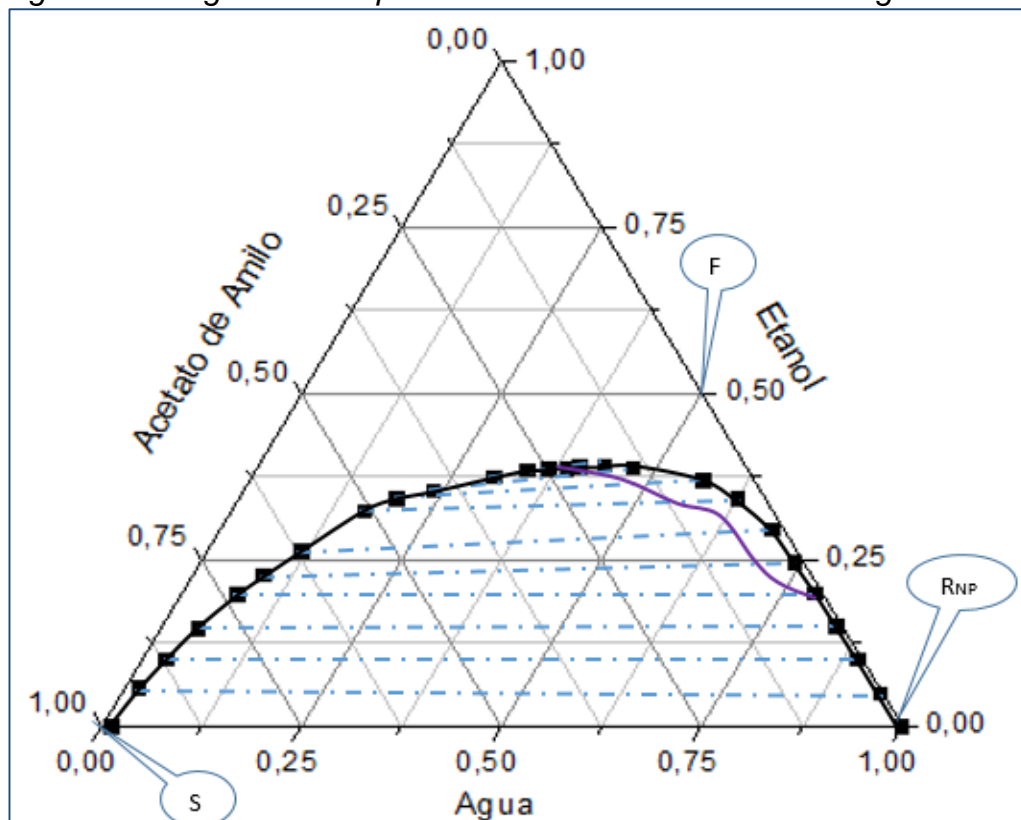
etanol-acetato de amilo, se detalla en la Figura 18, para este caso, la mezcla de alimentación está compuesta por Agua-Etanol, y el Acetato de Amilo cumple su función como solvente de arrastre[25].

Para el caso de la extracción en varias etapas a contracorriente continua, las corrientes de extracto y refinado fluyen de etapa en etapa a contracorriente y proporcionan dos productos finales, el refinado R_{NP} y el extracto E_1 [5].

El balance total de materia en la operación es:

$$F + S = E_1 + R_{NP} = M \quad (1)$$

Figura 18. Diagrama de equilibrio ternario Acetato de Amilo-Agua-Etanol.



Fuente: Autor (OriginLab 8.0)

Donde F hace referencia a la disolución de la alimentación, S es el solvente de extracción.

El punto M representa la mezcla total de las corrientes del sistema, conocido como punto de mezcla. Para ubicar el punto M sobre la línea FS (Figura 19), se realiza un balance de materia para la sustancia C, así:

$$F x_F + S y_S = E_1 y_S + R_{NP} x_{NP} = M x_M \quad (2)$$

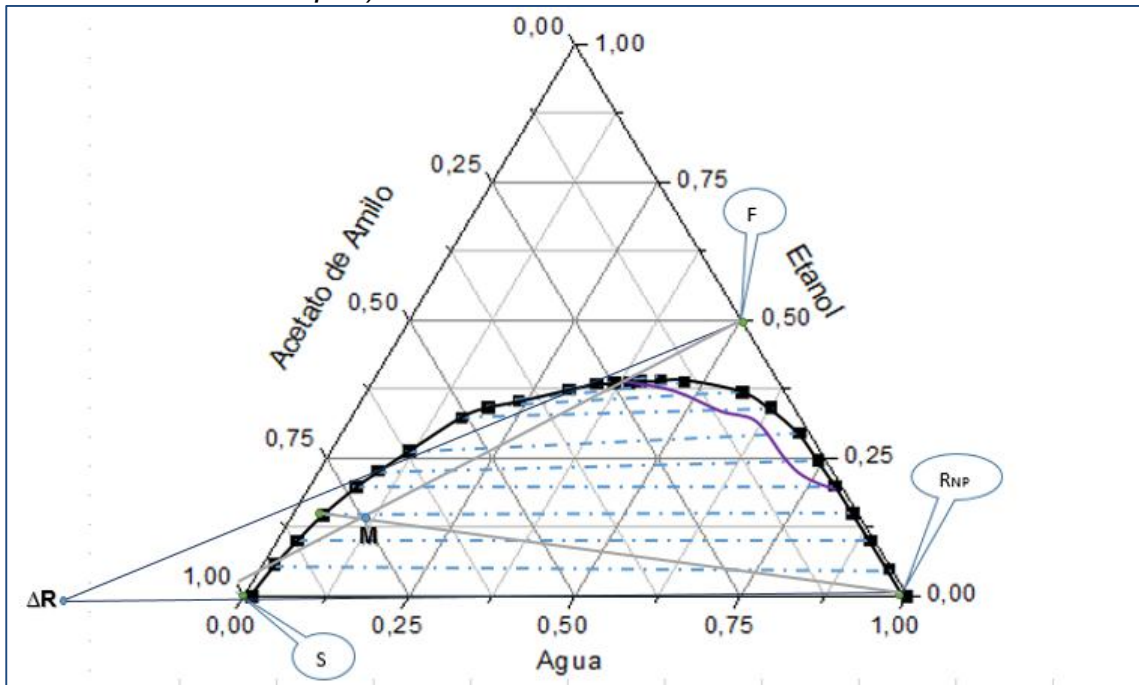
$$\frac{Fx_F + Sy_S}{F + S} = x_M \quad (3)$$

Al reordenar la ecuación (1), se define ΔR

$$R_{NP} - S = F - E_1 = \Delta R \quad (4)$$

En donde ΔR es el flujo neto saliente de la última etapa, es el flujo neto de la última etapa N_p . Las líneas E_1F y $R_{NP}S$ deben intersectarse en ΔR , tal como se observa en la figura 19.

Figura 19. Ubicación de flujos y composiciones conocidas. (Extracción a contracorriente en etapas).



Fuente: Autor (OriginLab 8.0)

En algunos casos la intersección puede ubicarse a la derecha del triángulo. Un balance de materia por etapa es[5]:

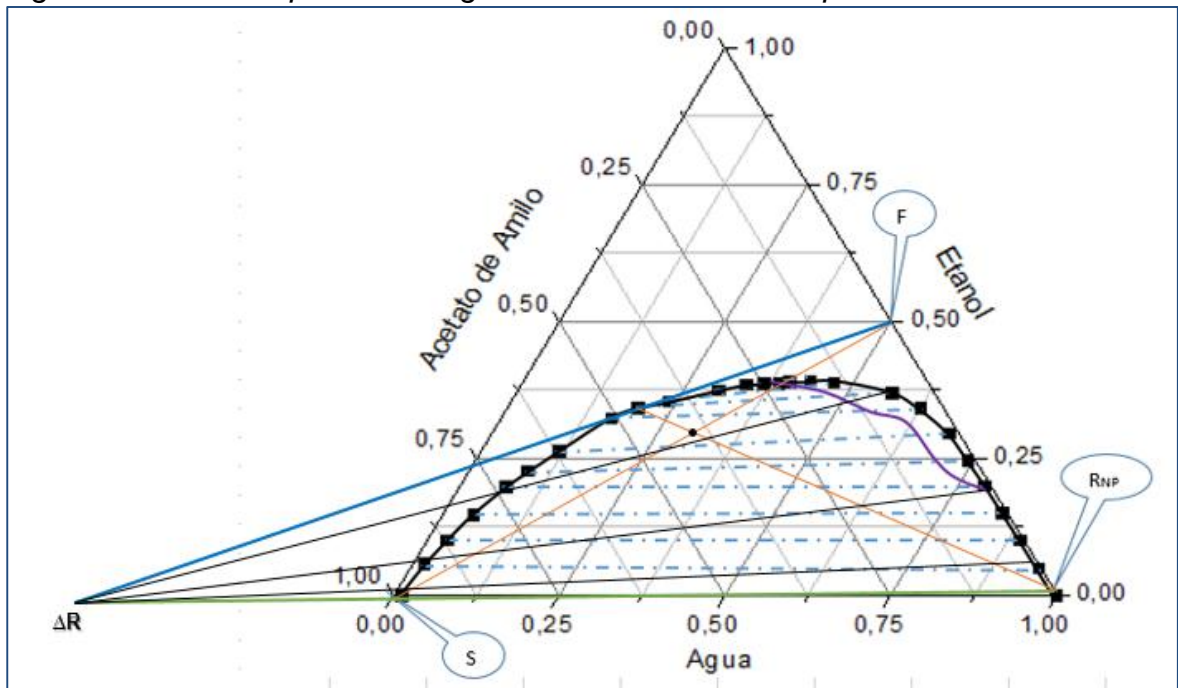
$$R_S + S = R_{NP} + E_S \quad (5)$$

$$R_{S-1} - E_S = R_{S-1} - E_S = \Delta R \quad (6)$$

Con base en las ecuaciones (3) y (4) se puede afirmar que el valor ΔR es constante para dos etapas adyacentes cualesquiera a lo largo de la columna.

Entonces, es posible realizar la construcción gráfica de las etapas de equilibrio mediante la ubicación de cada extracto y refinado en la zona de mezcla del diagrama ternario, tal como se muestra en la figura 20.

Figura 20. Solución por método gráfico del número de etapas de extracción.



Fuente. Autor (OriginLab 8.0)

Dado que en cada etapa estas corrientes se encuentran en equilibrio, una línea de unión que siga la línea del equilibrio, sirve de guía para ubicar R_1 a partir de E_1 , en el caso de la primera etapa. A continuación, una línea trazada desde ΔR hasta R_1 , proporciona el punto donde se ubica E_2 en la parte izquierda del diagrama sobre la curva del equilibrio (zona del extracto). Se ubica R_2 a partir de las líneas de equilibrio trazadas dentro de la zona de mezcla, y a partir de este punto, se repite este procedimiento sucesivamente hasta encontrar el valor mínimo requerido en el refinado, correspondiente a la composición x_{NP} .

Una vez alcanzado este punto, el número de etapas de equilibrio calculadas para la extracción, corresponde directamente a la cantidad de veces que se repitió el método gráfico para llegar al porcentaje de soluto especificado en el refinado.

3.1.3.2 Ecuaciones de diseño

Teniendo los valores anteriores a una temperatura y una presión adecuada se calcula velocidad de las soluciones en cada fase con las siguientes ecuaciones:

$$v_1 = 544 \left(\frac{d^2 \Delta S}{\mu_c} \right) \quad mm/s \quad (7)$$

$$Re = 0,999 \frac{dv_1 S_C}{\mu_c} \quad (8)$$

Donde v_1 es la velocidad de la fase dispersa a la fase continua, d es el diámetro de la gota, ΔS es la diferencia de las densidades en la fase dispersa y la fase continua, y μ_c es la viscosidad en la fase continua, también se calcula el número de Reynolds (Re) para esta velocidad donde S_C es la densidad de la fase continua.

Si el número de Reynolds es menor de 2, la v_1 se define a partir del resultado obtenido de la Ecuación 7, y se procede a calcular la velocidad de la fase continua a la fase dispersa (v_2); si el número de Reynolds es mayor de 2 se recalcula la velocidad de la fase dispersa a la fase continua con las siguientes ecuaciones:

$$v_1 = 108 \left(\frac{d^{1.143} \Delta S^{0.714}}{\mu_c^{0.429} S_C^{0.286}} \right) \quad mm/s \quad (9)$$

$$Re = 0,999 \frac{dv_1 S_C}{\mu_c} \quad (10)$$

Luego de obtener este parámetro, se utiliza la ecuación 11 para hallar la velocidad de la fase continua a la fase dispersa (v_2), y, de manera semejante al procedimiento anterior, se busca el valor del número de Reynolds con la ecuación 12:

$$v_2 = 544 \left(\frac{d^2 \Delta S}{\mu_D} \right) \quad mm/s \quad (11)$$

$$Re = 0,999 \frac{dv_2 S_D}{\mu_D} \quad (12)$$

Donde μ_D es la viscosidad en la fase dispersa y S_D es la densidad de la fase dispersa; si el número de Reynolds es menor de 2, se toma el resultado de la ecuación 11 para definir la velocidad de la fase continua a la fase dispersa (v_2), y posteriormente se calcula el diámetro de prueba de la torre (D_T). En caso que el número de Reynolds sea mayor de 2, (v_2) se obtendrá a partir de las siguientes ecuaciones:

$$v_2 = 108 \left(\frac{d^{1.143} \Delta S^{0.714}}{\mu_D^{0.429} S_D^{0.286}} \right) \quad mm/s \quad (13)$$

$$Re = 0,999 \frac{dv_2 S_D}{\mu_D} \quad (14)$$

El diámetro de prueba de la torre (D_T) se calcula con las siguientes ecuaciones y puede depender de la velocidad de la fase dispersa o la velocidad de la fase continua, según el valor obtenido:

$$D_T = \sqrt{\frac{4V_C}{\pi v_1}} = 1,128 \sqrt{\frac{V_C}{v_1}} \quad m \quad (15)$$

$$D_T = 1,128 \sqrt{\frac{V_D}{v_2}} \quad m \quad (16)$$

Donde V_C es caudal de la fase continua y V_D es el caudal de la fase dispersa; usando el mayor de los dos diámetros que se calcularon con las ecuaciones anteriores se establece el diámetro final de acuerdo al límite de la velocidad superficial en la fase dispersa, así:

$$A_T = \frac{\pi}{4} D_T^2 = 0,785 D_T^2 \quad m^2 \quad (17)$$

$$v_e = \frac{V_D}{A_T} \quad mm/s \quad (18)$$

Donde A_T es el área de la sección transversal de la torre y v_e es la velocidad superficial de la fase dispersa; si ésta velocidad es menor a 6,79 se puede tomar el diámetro de prueba mayor que se calculó anteriormente, en cambio, si la velocidad en la fase dispersa es mayor a 6,79 entonces se usa la ecuación 19 para hallar el diámetro de la columna:

$$D_T = \sqrt{\frac{4V_D}{\pi 6,79}} = 0,433 \sqrt{V_D} \quad m \quad (19)$$

Para el cálculo del espaciamiento entre los platos se debe tener en cuenta el diámetro de la torre calculado anteriormente, partiendo de la siguiente ecuación:

$$V_{it} = \frac{1000V_C}{D_T(H - 150)} \quad mm/s \quad (20)$$

Donde V_{it} es la velocidad entre el plato y H es el espaciamiento de prueba del plato (espaciamiento mínimo de 450 mm para diámetros menores a 1.5 m); Si V_{it} es menor de 15, $H=H$ de prueba y si V_{it} es mayor de 15, entonces se usa la siguiente ecuación:

$$H = \frac{66,7V_C}{D_T} + 150 \quad mm \quad (21)$$

Para el cálculo de los tubos de descenso se usan las siguientes ecuaciones:

$$A_{dc} \text{ de prueba} = \frac{V_C}{46} \quad m^2 \quad (22)$$

$$A_T = 0,785D_T^2 \quad m^2 \quad (23)$$

$$\frac{A_{dc}}{A_T} = A^* \quad (24)$$

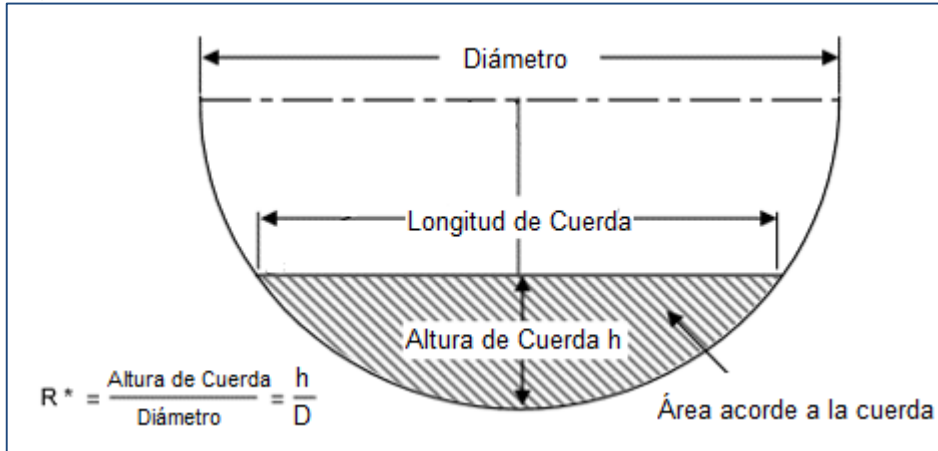
Donde A_{dc} es el *área del tubo de descenso* y A^* es la relación del área del tubo de descenso a través del área de la sección transversal de la torre, siendo este un valor que se puede encontrar en el anexo A, allí también se busca R^* que representa la relación entre la altura del tubo de descenso de acuerdo al diámetro de la torre, para luego usarse en la siguiente ecuación:

$$h \text{ de prueba} = 1000 * R^* * D_T \quad mm \quad (25)$$

$$h \text{ de prueba} = 120D_T \text{ es el mínimo} \quad mm \quad (26)$$

$$R^* = \frac{h}{1000D_T} \quad (27)$$

Figura 21. Área del tubo de descenso.



Fuente: Autor

Donde h es la altura acorde al tubo de descenso; respecto a la longitud de cuerda del tubo de descenso (c) y la longitud del tubo de descenso (L_{dc}), se usan las siguientes ecuaciones:

$$c \text{ de prueba} = \text{Aclaramiento del tubo de descenso} = \frac{33,3V_C}{L_{dcc}} \quad \text{mm} \quad (28)$$

$$c \text{ de prueba} = 75 \text{ (es el mínimo)} \quad \text{mm} \quad (29)$$

$$L_{dc} = \text{Longitud del tubo de descenso} = H - c \quad \text{mm} \quad (30)$$

El cálculo del área del agujero se diseña para el flujo en la fase dispersa y se determina por la profundidad de la capa en la fase dispersa debajo del plato (b) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$A_H = \frac{V_D}{98} \sqrt{\frac{S_D}{b\Delta S}} \quad \text{m}^2 \quad (31)$$

Donde A_H es el área total de dispersión del plato y n es el número total de orificios de 6mm de diámetro representada en la siguiente ecuación:

$$n = \frac{A_H}{2,83 \times 10^{-5}} \quad (32)$$

Para el cálculo de la entrada de la fase continua a la torre se usa un tubo de descenso invertido con las mismas dimensiones del tubo de descenso calculado anteriormente, respecto a la entrada de la fase dispersa se usa la siguiente ecuación:

$$c_{in} \text{ de prueba} = \frac{8,2}{V_D L_{dcc}} \quad mm \quad (33)$$

$$c_{in} \text{ de prueba} = 25 \text{ es el minimo} \quad mm \quad (34)$$

Donde c_{in} es el espacio libre de la entrada de la fase dispersa.

3.1.3.3 *Altura total de la columna*

La columna está formada por la zona de separación principal, y dos zonas críticas en la cima y el fondo de la torre, donde las dos fases dejan de estar en contacto antes de dejar la columna.

En la zona de separación principal se encuentran distribuidas las etapas de equilibrio obtenidas en la resolución del método gráfico del triángulo equilátero, a una misma distancia una de la otra a lo largo de la estructura cilíndrica del equipo.

En la parte superior de la torre se encuentra la zona de separación crítica de la cima, además de incluir la entrada de la fase continua, en esta se debe presentar una región diseñada para proporcionar el tiempo de residencia necesario para la coalescencia de la fase dispersa y el desacoplamiento de arrastre de las dos fases. En la base de la columna se encuentra la zona crítica del fondo, donde la longitud del tubo de descenso debe garantizar la reducción de la velocidad de la fase continua, para evitar la formación de bandas de emulsión bajo el último plato, evitando las condiciones de arrastre en la descarga de la fase pesada.

3.1.4 **Desarrollo y fabricación de la columna de extracción**

3.1.4.1 *Selección del Material de construcción*

En las plantas de procesos químicos, las principales consideraciones para la selección de materiales de ingeniería son usualmente la resistencia a altas temperaturas y a la corrosión. Se deben recomendar materiales que sean sustentables para las condiciones de proceso, teniendo en cuenta además de lo anterior, los requerimientos mecánicos de la estructura del equipo. El material más económico que cumpla con los requisitos mecánicos y de proceso debe ser seleccionado[26]. En algunos procesos, también es importante prevenir la

contaminación de las corrientes de proceso involucradas, y la reactividad de las sustancias químicas en ellas con el material de la superficie del equipo, con el fin de evitar problemas en la operación del proceso, como el arrastre de partículas en suspensión que obstruyan las tuberías en etapas posteriores, formación de compuestos explosivos, o presencia de impurezas en el producto final.

La selección del material en que se elaboró el cuerpo principal de la columna, es una de las variables limitantes en el diseño del equipo, pues debe tener ciertas propiedades de manera que no afecte la eficiencia de la operación; la reactividad química del material debe ser muy baja, en especial con los solventes químicos de mayor aplicación en la extracción líquido-líquido, debe tener suficiente resistencia para soportar la presión axial ejercida en las paredes por el cuerpo del líquido y además tener un precio razonable que permita su fabricación para fines educativos.

Para la construcción del prototipo se tuvo en cuenta el material de la columna, de las estructuras internas según el tipo de columna seleccionada, de las tuberías que conducen el líquido hacia la respectiva entrada de la fase pesada y la fase ligera, y desde las salidas del extracto y refinado hasta los tanques de almacenamiento para su recolección; también se tuvo en cuenta el material de la estructura que dará soporte completo al equipo.

Para escoger el material de la columna de extracción, se compararon las propiedades de tres materiales plásticos: polimetilmetacrilato (Acrílico), polipropileno de alta densidad (HDPE) y Politetrafluoroetileno (PTFE), del vidrio de borosilicato y el aluminio. Se consideraron propiedades como densidad, temperatura de descomposición, punto de inflamación y estabilidad química frente a otros compuestos, mostradas en la tabla 6.

Tabla 6. Principales propiedades de los materiales considerados para la construcción del prototipo escala laboratorio de una columna de extracción.

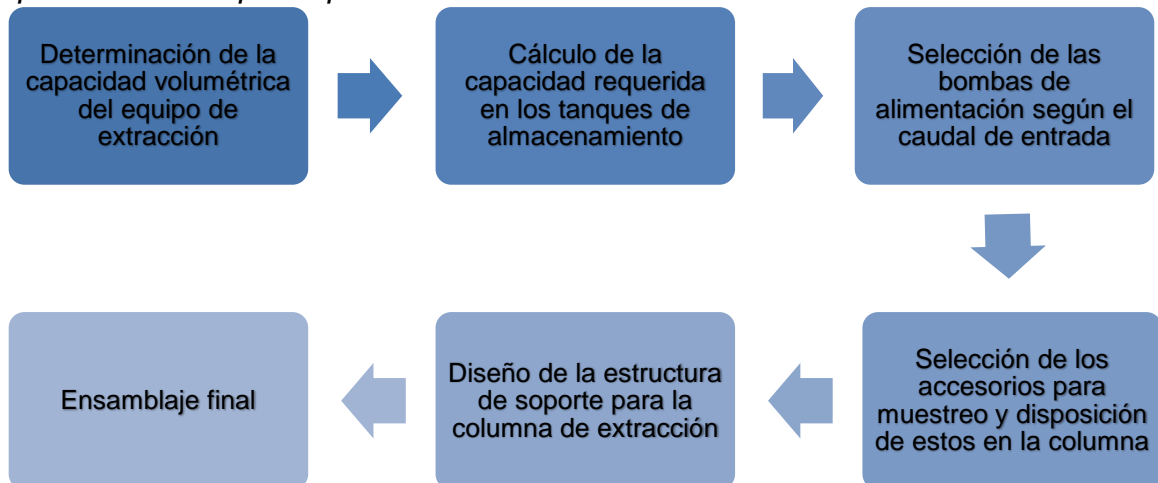
Material	Densidad	Módulo de elasticidad	Punto de inflamación	Temperatura de descomposición	Punto de fusión	Índice de refracción
Polimetilacrilato	1.180 g/cm ³	3.3 KN/mm ²	390°C	170°C	160°C	1.4905
Polipropileno	0.95 g/cm ³	1.5 KN/mm ²	440°C	287°C	173°C	1.5
Politetrafluoro etileno	2.1 g/cm ³	1 KN/mm ²	No aplica	350°C	327°C	1.375
Vidrio de Borosilicato	2.23 g/cm ³	64 KN/mm ²	301°C	821°C	550°C	1.473
Aluminio	2.6984 g/cm ³	70 KN/mm ²	300°C	760°C	230°C	1.39

Fuente: Perry, R.H.G., et al., *Manual del ingeniero químico*. 2001: McGraw-Hill.

3.1.4.2 *Sistemas complementarios*

- Tanques de almacenamiento. Se dispuso de dos tanques correspondientes al recipiente de la mezcla de alimentación, y al solvente de arrastre. Además, se cuenta con un tanque de almacenamiento para el extracto y otro para el refinado.
- Sistemas de conducción de líquido. Al ser un equipo de escala laboratorio, los líquidos son conducidos hacia y desde el interior de la columna mediante mangueras del material apropiado para evitar corrosión.
- Sistema de impulsión. Para la puesta en marcha de la torre, es necesario contar con un equipo auxiliar que impulse el líquido dentro del cuerpo principal de la columna, permitiendo el ingreso de los componentes del sistema ternario con caudales de entrada conocidos.
- Sistema de muestreo. Para el estudio en detalle de la operación de extracción, se dispuso en cada una de las etapas dispositivos que permitan la toma de muestras para analizar el avance del proceso de separación.
- Estructura de soporte. Se hizo necesaria la elaboración de una estructura metálica que soporte el peso del equipo de extracción, de los accesorios, y el peso generado por el líquido al ocupar completamente su volumen de trabajo. También se observó que la estructura no presentara balanceo o inclinación hacia alguna dirección por mala distribución de cargas al iniciar su operación.

Figura 22. Diagrama de flujo de los sistemas auxiliares requeridos para la operación de un prototipo de extracción a escala laboratorio.



Fuente: Autor

Luego de definir el tipo de extractor, realizar el dimensionamiento completo y elegir su material de fabricación, además de los accesorios complementarios que permiten el funcionamiento del equipo, se realizó el ensamblaje de la torre de separación

teniendo en cuenta la disposición final de los elementos asociados a este, que permiten su óptimo desempeño (figura 22).

3.1.5 Descripción detallada del equipo de extracción líquido-líquido

Una vez culminadas las etapas de diseño y construcción de la columna de extracción, se elaboraron diferentes documentos que faciliten la operación y mantenimiento del equipo a sus futuros usuarios. Debido a las aplicaciones netamente académicas para las que fue diseñado el equipo, es importante que cuente con el manual de operación y una guía de laboratorio con los pasos para llevar a cabo la práctica de extracción líquido-líquido, junto con las indicaciones de mantenimiento preventivo, que incluye las instrucciones del mantenimiento correctivo, en caso de ser necesario. También se realizó el diagrama de flujo del proceso y la hoja de especificaciones de los equipos auxiliares requeridos para la separación, así como incluir el análisis de los posibles riesgos asociados a la operación del equipo. En la siguiente tabla se especifican los parámetros mencionados con su respectiva normatividad.

Tabla 7. Anexos para la descripción del prototipo de extracción.

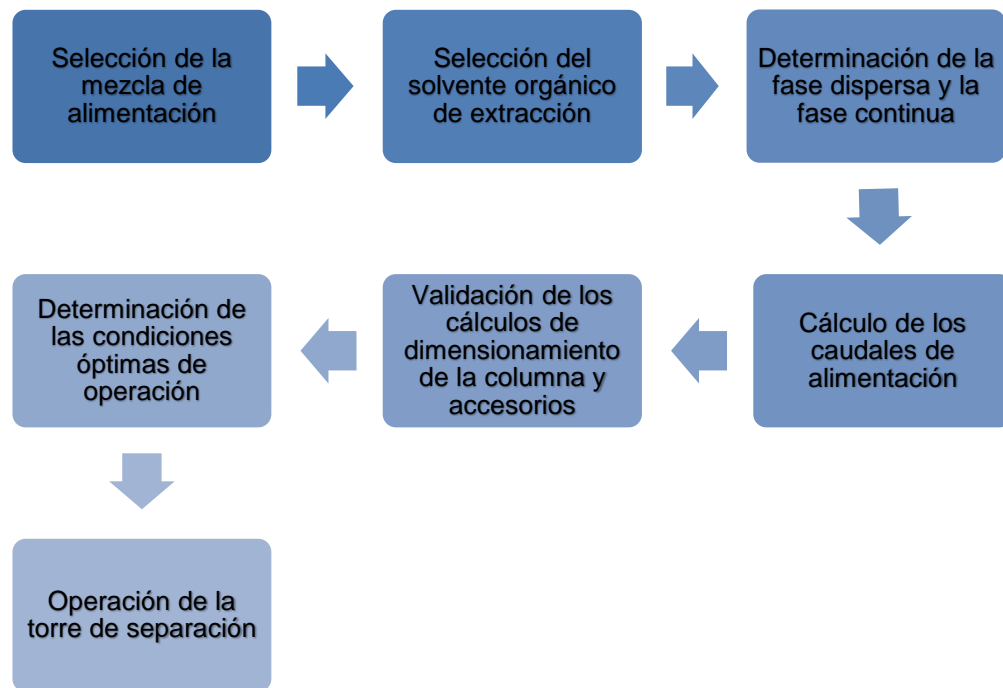
Documento elaborado	Normatividad
Diagrama de flujo del proceso	ISO 5807
Planos de dimensionamiento	ISO 129:1985
Data sheet equipos auxiliares	ISO 11014:2009
Manual de operación y mantenimiento del equipo	ISO 9000
Guía de laboratorio	
Procedimiento de trabajo seguro (Análisis de riesgos)	OSHAS 18 000

Fuente: Autor

3.2 IMPLEMENTACIÓN Y DIAGNÓSTICO DEL EQUIPO DE EXTRACCIÓN

Para la puesta en marcha del prototipo a escala laboratorio, se estudió el sistema ternario de aplicación, determinar las fases y sus correspondientes caudales de alimentación, y con estos datos, validar los cálculos de dimensionamiento y determinar las condiciones óptimas de operación del equipo, según la secuencia mostrada en el diagrama de flujo de la figura 23.

Figura 23. Metodología para la puesta en marcha del equipo de extracción.



Fuente: Autor

3.2.1 Toma de muestras y cálculo de composiciones

Debido a la importancia de la operación de extracción en Ingeniería Química, es necesario contar con datos suficientes que permitan estudiar el progreso de la extracción en diferentes regiones de la columna, no sólo en las corrientes de extracto y refinado. Para esto, se deben conocer las composiciones másicas en cada etapa de las tres sustancias involucradas, según el equilibrio ternario estudiado. El prototipo de extracción a escala laboratorio cuenta con dispositivos en cada una de las etapas de equilibrio que permiten la obtención de muestras para su posterior análisis.

Las composiciones de los tres componentes de la mezcla se hallaron utilizando medidas de densidad. Para esto se utilizó un densímetro portátil *densito 30px METTER TOLEDO* (Figura 24), con un rango de medida de 0 a 2 g/cm³ y una exactitud de ± 0.001 g/cm³. Se realizó una curva de calibración mediante el procedimiento de punto de nube [27]. Se prepararon 15 soluciones con un volumen total de 10 mL, variando el contenido de cada uno de los componentes (9-0.6 mL /

0.6-3 mL / 0.4-9 mL). La mezcla se mantuvo en constante agitación para garantizar la presencia de una sola fase que permita al instrumento detectar un valor de densidad promedio del sistema. Se usó el densímetro para encontrar el valor experimental de la densidad de cada uno de los componentes del sistema estudiado. Al conocer los valores de densidad y el volumen añadido de cada componente, es posible determinar matemáticamente las composiciones másicas de cada sustancia. De esta forma, es posible obtener una expresión para la densidad de la mezcla ternaria como función de cada uno de los componentes del sistema.



Figura 24. Densímetro Portátil DENSITO 30px METTER TOLEDO.

Fuente. Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad Francisco de Paula Santander

Posteriormente, se tomaron las muestras de cada etapa en la columna de extracción, y se realizaron medidas de densidad por triplicado para cada una de estas. La fracción másica del solvente de arrastre y el solvente de la alimentación se determinaron mediante la curva de calibración construida previamente, y la composición molar del soluto es calculada en términos de las otras dos, buscando satisfacer el balance de materia en cada etapa.

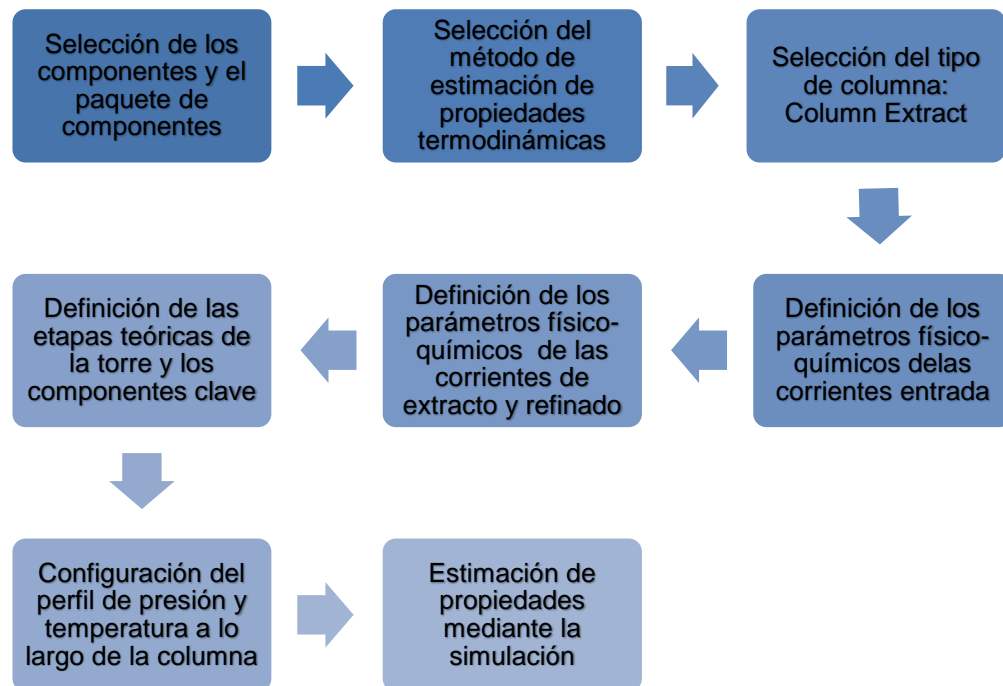
Las mediciones del equilibrio líquido- líquido fueron tomadas directamente de la columna de extracción en diferentes tiempos de retención (5, 10 y 15 minutos), con el fin de observar la influencia de esta variable en la separación de las fases dentro del equipo. Los valores de densidad fueron registrados a una temperatura de 29°C. El volumen de cada componente fue añadido con una precisión de ± 0.1 mL.

3.3 SIMULACIÓN DEL PROCESO

Para la simulación del proceso de extracción líquido-líquido se utilizó el software Aspen Hysys versión 8.6.

Para esto es necesario seleccionar los compuestos químicos que intervienen en el proceso, calcular la interacción entre estos y su distribución en varias fases por medio del paquete termodinámico, y definir las condiciones de operación de la unidad de extracción mediante los parámetros obtenidos de la puesta en marcha del equipo y finalmente, tener claro la topología del proceso definida en el diagrama de flujo de proceso (PFD). La secuencia de pasos a seguir en el simulador Aspen Hysys 8.6 se muestra en la figura 25.

Figura 25. Metodología para la simulación de la columna de extracción en el software Aspen Plus v 8.6.



Fuente: Autor

Aspen Hysys proporciona algunas propiedades como densidad, viscosidad, composición, capacidad calorífica, etc. Los valores obtenidos en la simulación del proceso de extracción son comparados con los resultados experimentales, lo que permite calcular la eficiencia de la separación realizada en el prototipo construido.

4. DISEÑO DEL EQUIPO DE EXTRACCIÓN

Es necesario implementar un procedimiento de diseño mediante una secuencia de pasos lógica y ordenada que permita definir en su totalidad la columna de extracción líquido-líquido, para su posterior implementación. Generalmente la calidad del estudio realizado se ve reflejada en las pruebas de funcionamiento del equipo, con las cuales se podrá observar la eficiencia experimental alcanzada en las separaciones. Con el fin de alcanzar un objetivo de eficiencia exigente que permita el análisis adecuado de la operación de extracción, es importante establecer adecuadamente las variables de diseño y operación que pueden afectar su capacidad operativa, considerando siempre la posibilidad de actualización y mejora del prototipo, para evitar su obsolescencia prematura.

4.1 DISEÑO PRELIMINAR DE LA COLUMNA

El primer paso para el diseño y desarrollo de todo proceso químico es la etapa de conceptualización. Durante esta etapa se debe realizar la revisión bibliográfica de todas las características necesarias para definir el equipo a diseñar. Es importante además, conocer el campo de aplicación que tendrá la columna una vez construida, así como los usuarios finales de, en este caso, la torre de extracción, para definir todas las variables involucradas que puedan modificarse debido a esto.

El prototipo de extracción líquido-líquido a escala laboratorio tendrá como usuarios finales a todos los estudiantes y docentes que forman parte del programa de Ingeniería Química de la Universidad de Pamplona, lo que indica que su aplicación se dará en el entorno educativo. Es importante que la columna sea fácilmente operable; su estructura debe ser estable y flexible de tal manera que resista esfuerzos presentes en una inadecuada manipulación; el fenómeno de separación debe ser observable y brindar resultados experimentales para ser analizados posteriormente; su diseño debe tener consideraciones de seguridad y salud, además de contar con toda la información necesaria para su operación, limpieza y mantenimiento.

4.1.1 Condiciones Básicas de Diseño

En este apartado se mencionan las bases de diseño establecidas para definir claramente el posterior dimensionamiento del equipo de separación. Al ser un prototipo a escala laboratorio, el diámetro del cilindro principal de la columna de extracción debe estar en un rango de 30 a 100 mm, tomando esto en cuenta, se diseñó una torre de separación con un diámetro nominal de 50 mm, de tal manera que sea lo suficientemente amplia para permitir el acceso manual a su interior, con fines de limpieza y mantenimiento de accesorios internos, sin necesidad de excederse hasta el límite superior permitido, lo cual implicaría una mayor altura de la zona de separación, aumentando sus costos de fabricación.

Generalmente la operación de estos equipos es en modo discontinuo, y la estructura y disposición de conexiones y accesorios debe tener alto grado de similitud con los equipos industriales de extracción por disolvente presentes en una planta química. Dado que el objetivo es establecer los rasgos característicos de operación del equipo, como eficiencia de separación, altura de etapa, número de etapas teóricas y capacidad de flujo, el diseño de un extractor similar a los existentes a escala industrial debe ser usado[28].

4.1.1.1 Selección del tipo de columna usando el Método *ELECTRE*

Los extractores líquido-líquido involucran una mayor cantidad de variables que las operaciones vapor líquido porque la estructura de los líquidos es más completa que la de los gases[3]. La gran cantidad de extractores disponibles y las numerosas variables de diseño que deben ser tomadas en cuenta dificulta la elección de una configuración determinada para una aplicación específica. Por esta razón, los equipos se han agrupado en cuatro clases para facilitar su comparación:

1. Mezcladores-sedimentadores
2. Contactores continuos a contracorriente, sin accionamiento mecánico:
 - Torres empacadas
 - Torres de placas perforadas
 - Torres spray
3. Contactores continuos a contracorriente, con agitación mecánica:
 - Columna pulsada de platos perforados
 - Columna de Scheibel
 - Contactador de Oldshue-Rushton
 - Contactador de Disco Rotatorio
 - Columna Kühni
 - Columna de Platos Reciprocantes
4. Extractores centrífugos

La descripción de cada uno de los extractores mencionados está descrita en la tabla 5 del marco teórico. En la tabla 8 se muestran las ventajas y desventajas de cada una de las clases de configuraciones posibles de un extractor.

Tabla 8. Ventajas y desventajas de los diferentes equipos de extracción.

CLASE DE EQUIPO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Mezcladores	Buen contacto Amplio rango de relación de flujo Bajo espacio libre Alta eficiencia Muchas estaciones disponibles Aumento de escala fiable	Altos costos de potencia Alta inversión Requiere amplio espacio de suelo Puede ser necesario bombeo entre etapas Gran sostenimiento
Contactores continuos a contracorriente (sin accionamiento mecánico)	Costo inicial bajo Bajo costo de operación Construcción más sencilla	Rendimiento limitado con una pequeña diferencia de densidad No se puede manejar la proporción de flujo alto Alto espacio libre A veces baja eficiencia Difícil aumento de escala
Contactores continuos a contracorriente (con agitación mecánica)	Buena dispersión Costo razonable Muchas etapas posibles Escalado relativamente fácil	Rendimiento limitado con una pequeña diferencia de densidad No puede manejar sistemas emulsionantes No se puede manejar la proporción de flujo alto
Extractores centrífugos	Maneja la diferencia de baja densidad entre fases Volumen de retención bajo Tiempo de retención corto Bajo requerimiento de espacio Pequeño inventario de disolvente	Costos iniciales elevados Alto coste operativo Alto coste de mantenimiento Número limitado de etapas (2-7) en una sola unidad

Fuente: Reissinger, K. and J. Schroter, Selection criteria for liquid-liquid extractors. Chemical Engineering, 1978. 85(25): p. 109-118.

Cada una de las clases de extractores que agrupan a equipos con características semejantes, es considerada como alternativa para el diseño de la columna de separación. La selección del tipo de columna se realiza mediante el método ELECTRE, que permite comparar las ventajas y desventajas de cada una de las alternativas, relativas a cada criterio según un orden de priorización, para luego jerarquizarlas de mayor a menor, obteniendo así la alternativa que tiene mejor comportamiento en los factores evaluados, frente a las demás. En la tabla 9 se muestran los factores de comparación y su valor de ponderación, de esta forma, se define el vector de pesos para el caso en estudio. En la tabla 10 se realiza el análisis y la comparación de alternativas, según los factores definidos.

Tabla 9. Ponderación de factores de comparación.

FACTOR	PONDERACIÓN (%)
Costo inicial	17
Complejidad de la construcción	20
Costos de mantenimiento	10
Escalado	12
Flexibilidad del proceso	17
Tiempo de residencia	4
Dispositivos auxiliares	20
Vector de pesos	
(0.17, 0.20, 0.10, 0.12, 0.17, 0.04, 0.20)	

Fuente: Autor

Tabla 10. Comparación de alternativas.

	MEZCLADORES	SIN ACCIONAMIENTO MECÁNICO	CON AGITACIÓN MECÁNICA	EXTRACTORES CENTRÍFUGOS
FACTOR	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
COSTO INICIAL	Alto	Bajo	razonable	Muy alto
COMPLEJIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN	Normal	Sencillo	Complejo	Muy Complejo
COSTOS DE MANTENIMIENTO	Altos costos de mantenimiento, opera en discontinuo, sin lavados durante el proceso, se debe detener completamente la operación para su mantenimiento.	Bajos costos debido a su sencilla Configuración interna, fácil desmontaje del equipo para un mantenimiento completo. Además, puede ser lavado cambiando los componentes del sistema ternario por sustancias para su lavado.	Altos costos por la cantidad y complejidad de las piezas mecánicas que accionan los mecanismos de agitación hacen que su mantenimiento sea más complejo.	Los equipos de este tipo están conformados por piezas pequeñas de difícil ensamblaje y mantenimiento riguroso, con costos muy altos.

Fuente: Autor

Tabla 10. (Continuación)

	MEZCLADORES	SIN ACCIONAMIENTO MECÁNICO	CON AGITACIÓN MECÁNICA	EXTRACTORES CENTRÍFUGOS
FACTOR	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
ESCALADO	Cambio de escala fiable	Dificultad de escalado	Escalado relativamente fácil	Dificultad de escalado
FLEXIBILIDAD DEL PROCESO	Media: se pueden conectar varias unidades para formar una cascada a contracorriente.	Amplio rango de aplicación. Inadecuado para líquidos con sólidos en suspensión y sistemas con diferencia de densidad baja.	Limitado: Operaciones con sólido-líquido y gases, tensión interfacial alta, baja diferencia de densidades y líquidos de alta viscosidad.	Bajo: diseñado para sistemas específicos con baja diferencia de densidad.
TIEMPO DE RESIDENCIA	Alto, para alcanzar un equilibrio de 80 a 90%	Corto por etapa	Corto por etapa	Muy corto 1 min
DISPOSITIVOS AUXILIARES	Dispositivos comunes: Mezclador a chorro, varios dispositivos en serie, bomba centrífuga para alimentación, inyectores.	Dispositivos sencillos: Bombas de alimentación, aspersores, empaque interno.	Dispositivos complejos de agitación: cojinetes, cajas, ejes de agitación, bombas para impulsar el líquido constantemente.	Dispositivos complejos: Eje rotatorio, cierres mecánicos, motor rotatorio.

Fuente: Autor

Tabla 11. Análisis de Importancia.

	MEZCLADORES	SIN ACCIONAMIENTO MECÁNICO	CON AGITACIÓN MECÁNICA	EXTRACTORES CENTRÍFUGOS
FACTOR	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
COSTO INICIAL	3	7	5	2
COMPLEJIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN	6	8	5	3
COSTOS DE MANTENIMIENTO	5	7	4	3
ESCALADO	7	5	4	3
FLEXIBILIDAD DEL PROCESO	6	8	5	4
TIEMPO DE RESIDENCIA	3	6	7	8
DISPOSITIVOS AUXILIARES	6	8	4	4

Fuente: Autor

Tabla 12. Matriz de concordancia.

0	0.06030227	0.29586796	0.28221255
0.40953471	0	0.39235808	0.28221255
0.06744076	0.01909337	0	0.21065838
0.00954669	0.01909337	0.07594124	0

Fuente: Autor

Tabla 13. Matriz de discordancia.

-	1	0.71919495	0.30697471
0.31247896	-	0.0355784	0.06595968
1	1	-	0.30898746
1	1	1	-

Fuente: Autor

Tabla 14. Relaciones de dominancias.

	DOMINANCIA POR FILA	DOMINANCIA POR COLUMNA	DIFERENCIA DE PRIORIZACIÓN	PRIORIZACIÓN
A1	A2,A4	A2	1	2 lugar
A2	A1,A3,A4	-	3	1 lugar
A3	A4	A2	0	3 lugar
A4	-	A1,A2,A3	-3	4 lugar

Fuente: Autor

Luego de realizar el análisis, se observa que la Alternativa 2 es la que mejor se adapta a los factores de comparación establecidos, pues presenta la mayor dominancia ante las demás alternativas. Los contactores continuos sin accionamiento mecánico presentan una valoración favorable en cuanto a costo inicial, complejidad de la construcción, flexibilidad del proceso, y baja complejidad de dispositivos auxiliares, siendo estos los factores de mayor peso en la selección del tipo de extractor.

La alternativa 2 hace referencia a extractores sin dispositivos de agitación mecánica, entre los cuales se encuentran torres de placas perforadas, de spray, y empacadas. Debido a que no presentan grandes diferentes que permitan valorar cualitativamente los equipos, para luego comparar cuantitativamente sus características por el Método Electre, se hace un análisis de los factores más importantes y su influencia en la eficiencia de la separación según lo reportado por estudios ya existentes.

Se escogió una columna de platos perforados debido al alto grado de dispersión de las gotas, las cuales se vuelven a formar en cada plato presentando más área de contacto superficial, lo que permite una buena transferencia de masa y la coalescencia de la fase dispersa, dando como resultado elevadas tasas de extracción en la columna con un mayor rendimiento y eficiencia de separación,

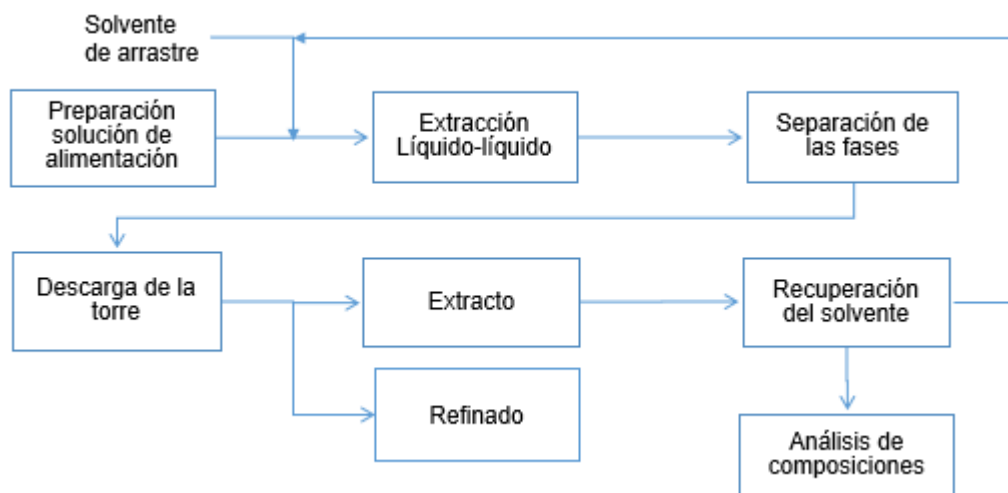
además de un menor arrastre orgánico o pérdida orgánica por lo tanto menor gasto de disolvente, por otro lado no hay formación de impurezas, hay menos contaminación del medio ambiente debido a su sistema cerrado y también son relativamente económicas por su reducción de costos de operación y mantenimiento; pueden cubrir una amplia gama de servicios y las condiciones de operación, y se pueden escalar fácilmente hasta tamaños grandes. Las aplicaciones incluyen la eliminación de contaminantes de hidrocarburos ligeros como se mencionó anteriormente, el tratamiento de aceite lubricante y la recuperación de compuestos aromáticos. Un número de diferentes diseños de bandeja se puede especificar en función de la aplicación. Además se eligió esta columna puesto que existen ecuaciones de diseño que hacen viables la construcción de un prototipo.

Numerosas pruebas que se han hecho con torres de platos perforadas han demostrado ser efectivas cuando el diseño es adecuado a la operación[29]. El arreglo más común es donde el líquido disperso pasa a través de las perforaciones y burbujea a través de la fase continua; el líquido pesado fluye por los bajantes de cada uno de los platos en donde la interfase se localiza en la parte superior de la torre. Otra alternativa consiste en que el líquido pesado se comporte como la fase dispersa y de esta forma, la operación ocurre a la inversa, en donde la interfase se localiza en la parte inferior de la torre o de igual modo el líquido pesado sea disperso en la parte superior del plato y en la parte inferior sea continuo en donde la interfase se localiza en medio de la torre.

4.1.2 Diagrama de Bloques

En algunas mezclas usadas típicamente en procesos industriales, la mejor opción para recuperar mayor cantidad del componente de interés, es la extracción líquido-líquido. La figura 26 muestra un diagrama de bloques típico de esta operación, adaptado a un proceso discontinuo practicado a escala laboratorio. El primer paso es la preparación de la solución de alimentación, la cual ingresa por la entrada inferior de la columna, el solvente de arrastre es alimentado por la parte superior de la torre, de esta forma, la sustancia más ligera atraviesa la estructura completa del extractor, al tener menor densidad, garantizando mayor tiempo de contacto entre las dos fases. Gracias a esto se lleva a cabo el proceso de extracción líquido-líquido por afinidad química del solvente de arrastre con el soluto de la alimentación. Se debe disponer de un tiempo de retención de 10 a 15 minutos más para que se lleve la separación de las fases. Después de esto, la torre se descarga, y el extracto es tratado para recuperar el solvente, generalmente mediante un proceso de destilación simple, para ser usado posteriormente en una nueva extracción. Para estudiar los resultados obtenidos en la separación, finalmente se analizan las composiciones del extracto y refinado.

Figura 26. Proceso típico de extracción líquido-líquido a escala laboratorio.



Fuente: Autor

4.1.3 Condiciones de operación

4.1.3.1 Presión

En operaciones con líquidos se consideran estables las condiciones de presión a lo largo de todo el equipo, sólo existen pequeñas variaciones en la región superior de la torre, pero esto no afectará significativamente el equilibrio líquido-líquido, por lo que se toma el valor de la presión local de Pamplona, a 583 mmHg.

4.1.3.2 Temperatura

La extracción es un proceso adiabático en el que sólo existe transferencia de materia, pues no hay reacción química que genere o consuma calor. La temperatura se mantendrá constante para todas las etapas de la columna, puesto que la alimentación y el solvente ingresan a la misma temperatura. Las corrientes de salida tendrán, por esta razón, la misma temperatura, que para el caso tiene un valor cercano a 20°C, la temperatura ambiente de la ciudad.

4.2 DIMENSIONAMIENTO DE LA COLUMNA DE EXTRACCIÓN

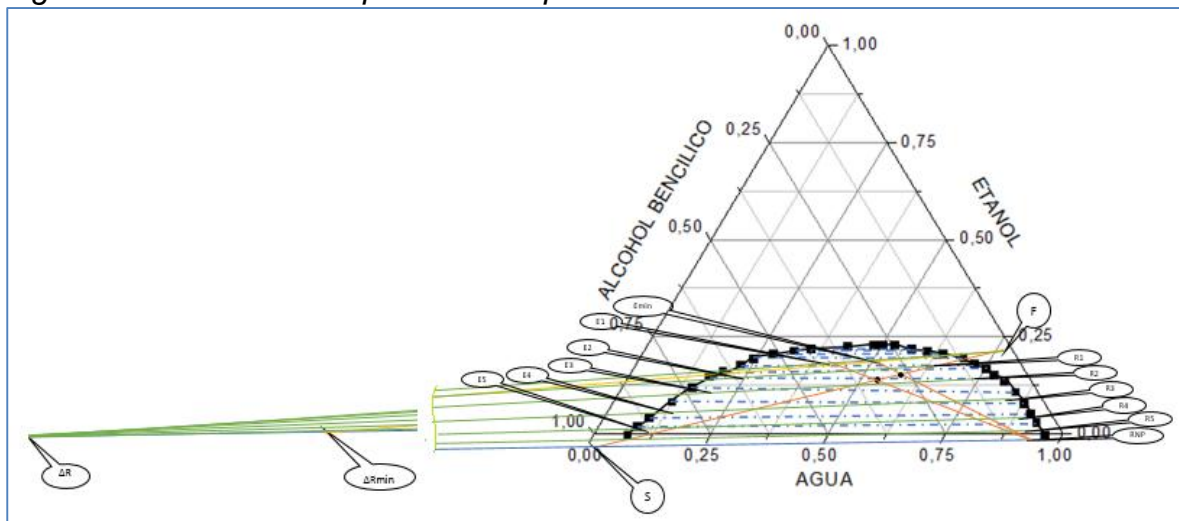
De acuerdo con las ecuaciones presentadas en la sección 3.2 del capítulo anterior, se realizaron los cálculos pertinentes para definir las dimensiones de la columna de extracción líquido-líquido a escala laboratorio. Para el dimensionamiento del equipo es necesario definir un sistema ternario específico, con el fin de usar las

propiedades de sus componentes como punto de partida en las ecuaciones de diseño. En este caso, se estudió el sistema Agua (H_2O) – Etanol (C_2H_6O) y Alcohol Bencílico (C_7H_8O). El estudio realizado para la selección del solvente de arrastre se muestra en detalle en la sección 5.3 del capítulo de Diagnóstico y Análisis de Funcionamiento.

4.2.1 Cálculo de etapas teóricas

Antes de realizar los cálculos para las dimensiones es necesario saber cuántas etapas tendrá la columna y una manera específica para hallarlas es por medio del método gráfico del triángulo rectángulo, el cual muestra el equilibrio entre las fases. **(Bibliografía EII etanol)**. Para la mezcla ternaria estudiada, se trabajó con una alimentación de 75% agua y 25% etanol y el alcohol bencílico como solvente puro, en la figura 27 se observa el procedimiento que se siguió para hallar el número de etapas. El primer paso fue ubicar los puntos F, S y R_{NP} , luego se trazó una línea desde F hasta S y de igual manera una línea de R_{NP} hasta S y se extrapoló, teniendo la ubicación de estas líneas se buscó una línea de reparto que pase por la alimentación extendiéndola hasta que corte con la línea $R_{NP}S$, este punto será ΔR_{min} , para hallar el punto de mezcla con el cual se calcula el solvente mínimo se trazó una línea desde E_{min} hasta R_{NP} y donde corte con la línea FS se lee este punto.

Figura 27. Cálculo de etapas teóricas para el sistema estudiado.



Fuente: Autor (Origin Lab 8.0)

Se hallaron los valores de cada uno de los componentes del punto de mezcla y se halló el solvente mínimo (S_{min}), reorganizando la ecuación 3, teniendo este valor se calculó un porcentaje del solvente por encima del mínimo (en este caso se usó 1,5 veces el solvente por encima del mínimo) y se calculó nuevamente el punto de mezcla con la ecuación 3, ubicando este resultado en el triángulo. Luego se trazó

una línea desde R_{NP} que pase por este nuevo punto de mezcla hasta que choque con el domo, este es el valor $E1$, seguidamente se pasó una línea desde F que pase por $E1$ y se extrapola hasta la línea $R_{NP}S$, el punto de corte de esta línea es ΔR ; finalmente se trazó una línea de reparto por $E1$ para hallar $R1$ y luego se extrapola una línea desde $R1$ hasta ΔR , en la región del extracto, donde se corte $R1$ y ΔR se toma el valor de $E2$. De la misma forma se trazó una línea de reparto desde $E2$ para hallar $R2$ realizando el mismo procedimiento. La operación termina cuando el valor del extracto esté por debajo de R_{NP} , en este momento se procedió a contar el número de etapas, obteniéndose un total 5 etapas teoricas.

De acuerdo a esto, se diseñó la columna de extracción a partir de módulos separables para que se pueda utilizar para cualquier tipo de sistema ternario, con el fin de tener un prototipo flexible según el valor de las etapas teóricas que se calculen para cada sistema. Viendo los cálculos que se hicieron con el equilibrio se puede determinar que el número de etapas para la columna es de 5.

Teniendo el valor del número de etapas se determinan los valores de dimensionamiento de una torre de extracción líquido-líquido a escala de laboratorio usando algunas de las ecuaciones de una torre de extracción comercial calculada preliminarmente, como lo son el diámetro mínimo de la gota, el caudal de la fase continua, el caudal de la fase dispersa, la densidad de la fase continua, la densidad de la fase dispersa, la diferencia de densidades, la viscosidad de la fase continua y la viscosidad de la fase dispersa.

4.2.2 Cálculo de las dimensiones del extractor

Para una columna de platos perforados la configuración del extractor consta de los siguientes elementos:

- Módulo común
- Módulo de entrada
- Platos perforados
- Derramaderos o bajantes
- Falso plato (entradas)

En la selección de la fase dispersa se escogió la mezcla de etanol y agua, con el fin de generar mayor área de contacto superficial con el solvente a escoger, de igual forma el solvente se seleccionó como la fase continua debido a que este necesita menor velocidad para ingresar a la torre favoreciendo la transferencia de masa.

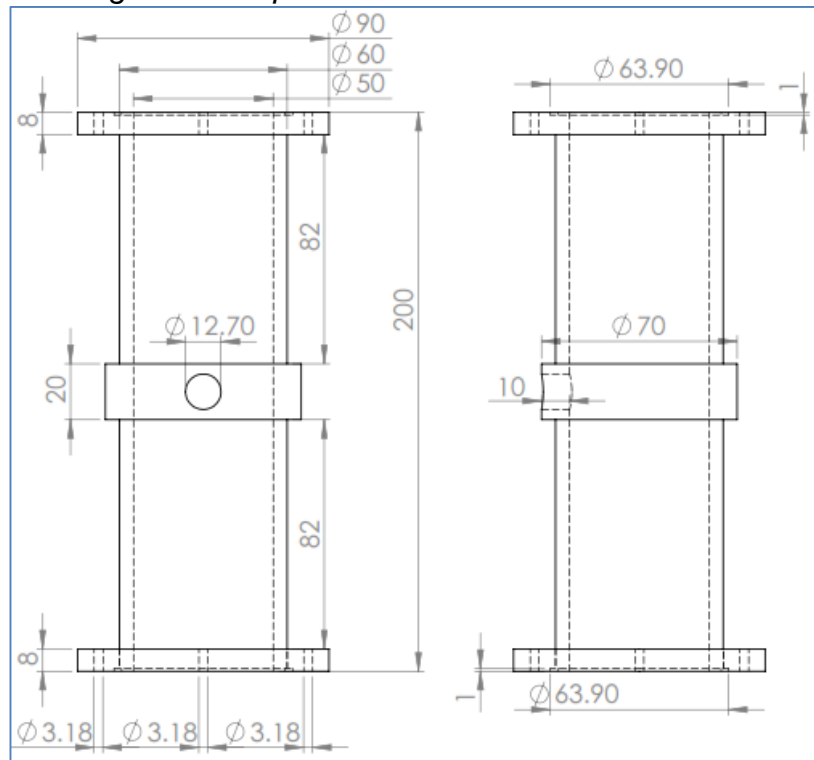
Las torres que presentan esta configuración están diseñadas para que la mezcla de alimentación, de menor densidad que el solvente de extracción, ingrese por el fondo de la torre, de esta forma, asciende progresivamente y es dispersada por los orificios de cada plato. El solvente orgánico entra por la región superior de la columna, por su mayor densidad, no ingresa por los orificios de la zona de dispersión del plato, recorriendo la superficie del plato hasta encontrar el área del bajante, el cual es

suficientemente largo para llevarlo hasta la superficie de la siguiente placa perforada, donde entra nuevamente en contacto con la fase ligera ascendente.

El diámetro de la torre se estableció con un valor de 5 mm; en el algoritmo expuesto en la metodología para diseño riguroso de un extractor, el cálculo del diámetro de la torre depende de la velocidad de la fase continua a la fase dispersa por lo cual se parte de la ecuación 7 para hallar este valor, usando este valor se calcula un diámetro de prueba con la ecuación 15, este resultado se reemplaza en la ecuación 19 obteniendo como resultado 0,0500 m, siendo este el valor del diámetro de una torre a escala laboratorio; para determinar el espaciamiento entre los platos, se usó la ecuación 21, dando como resultado un valor de 188,708 mm.

La torre está compuesta por 6 módulos los cuales cuentan con las siguientes características: una altura de 200 mm; separado a una distancia de 82 mm de cada uno de los extremos, se encuentra una sección con un diámetro externo mayor, que tiene un orificio de 12,7 mm de diámetro, con el fin de colocar acoples rápidos de ½ pulgada para tomar muestras en cada módulo durante la operación, esta sección tiene un diámetro externo de 70 mm, una altura de 20 mm y 10 mm de profundidad en el orificio dispuesto para los acoples. En la figura 28 se observa el plano diseñado para cada módulo.

Figura 28. Especificaciones del módulo común.



Fuente: Autor (Solidworks 2014)

Para facilitar el entendimiento del diseño propuesto para esta pieza, en la figura 29 se muestra el isométrico del módulo.

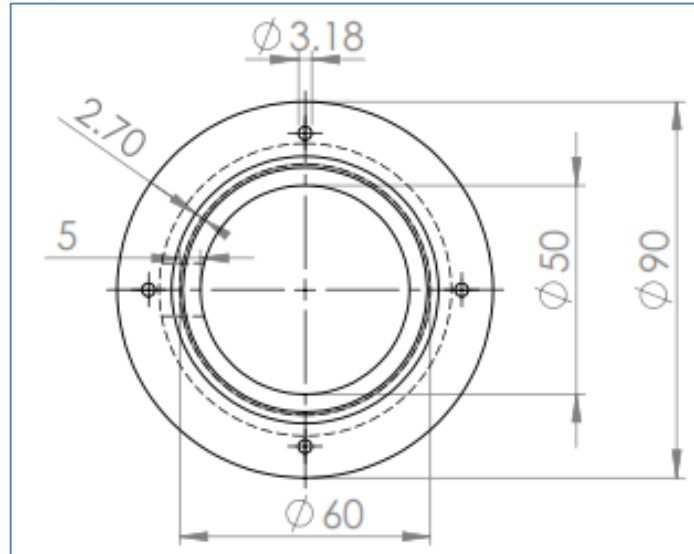
Figura 29. Isométrico del módulo para cada etapa.



Fuente: Autor (Solidworks 2014)

La figura 30 muestra el valor del diámetro de la torre de 50 mm, también se observa una brida de 90 mm de diámetro, dispuesta en cada extremo, con el fin de desmontar las piezas sin acciones destructivas, en su superficie hay cuatro perforaciones para ajustar tornillos con un diámetro de 3,18 mm cada uno, el espesor de la torre es de 5 mm, además para poder sellar herméticamente cada sección se usaron unos empaques O'ring el cual es un tipo de empaque mecánico en forma circular fabricado en caucho con especificaciones de 2,7 mm de diámetro de espesor 57 mm de diámetro interno.

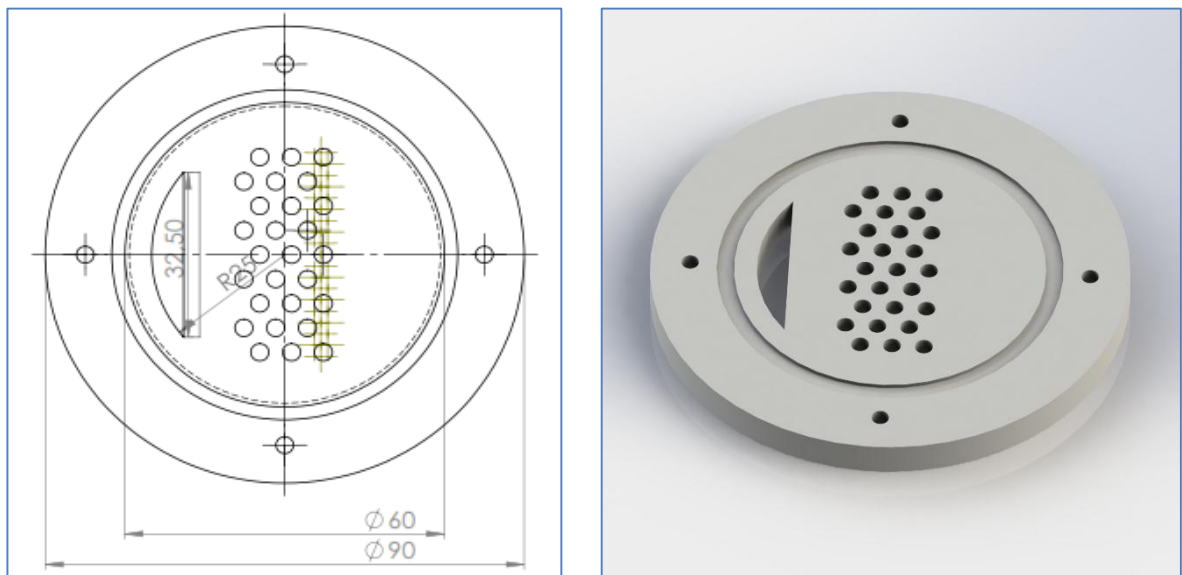
Figura 30. Especificaciones radiales de la torre.



Fuente: Autor (Solidworks 2014)

Para el cálculo de los platos se determinó el diámetro de los orificios siendo este un valor de 3 mm; se estableció el área total de dispersión usando las propiedades iniciales de la fase dispersa, según la ecuación 31, El número total de orificios se calculó utilizando la ecuación 32 obteniendo un resultado de 25,297 agujeros con un espaciado triangular de 2,58 mm. La altura de cuerda h representa la distancia desde el círculo interno del plato hasta el extremo del plato donde se ubica el tubo de descenso, tomada sobre el diámetro total del plato, se utilizó la ecuación 26, que dio como resultado 6,024 mm, la distancia desde el área de dispersión al extremo contrario del plato dio como resultado 16,344 mm. El plano correspondiente a esta pieza y su isométrico se muestran en la figura 31.

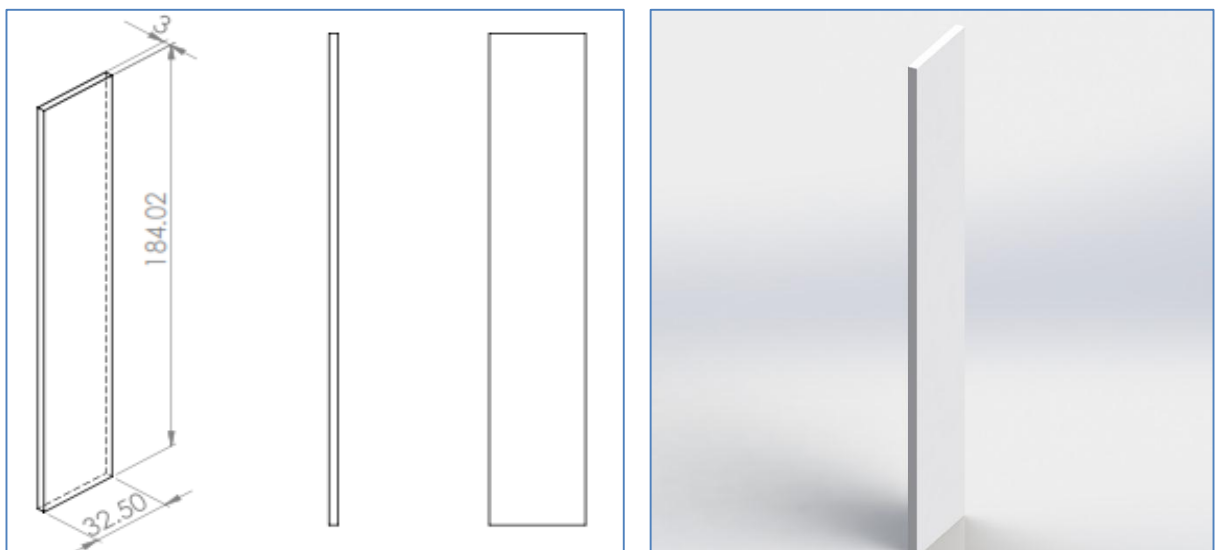
Figura 31. Especificaciones del plato perforado: a) Plano del plato en la vista superior. b) Isométrico de la pieza diseñada.



Fuente: Autor (Solidworks 2014)

Respecto a los bajantes de cada uno de los platos se muestran con las siguientes especificaciones: son láminas de 3 mm de espesor con 32,5 mm de ancho, los cuales van sujetas en el extremo donde está la altura acorde al bajante, calculada con la ecuación 30, obteniendo un resultado de 184,022 mm. Para el espacio del bajante hasta el siguiente plato, se usa el mínimo espacio establecido de una torre comercial cambiando la escala a las dimensiones del prototipo, el cual da un resultado de 15,978 mm. Así como se muestra en la siguiente figura.

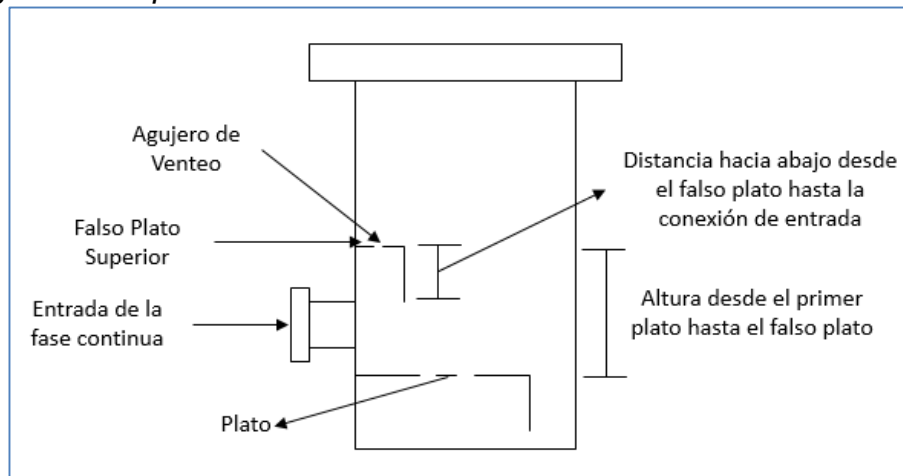
Figura 32. Especificaciones de los bajantes para cada uno de los platos.



Fuente: Autor (Solidworks 2014)

Los cálculos que se realizaron para la entrada de la fase continua son los siguientes: el ancho del falso plato superior (h) es el mismo valor de la altura acorde al bajante calculado anteriormente, de igual forma el diámetro del agujero de venteo es el mismo resultado de los diámetros de orificios de los platos, además la altura desde el primer plato hasta el falso plato superior es la misma longitud de la cuerda del bajante L_{dc} y la distancia hacia abajo desde el falso plato hasta la conexión de entrada de la fase continua es la mitad del diámetro de entrada de la fase continua con un valor de 12,7mm. La figura 33 explica mejor estos datos.

Figura 33. Especificaciones del módulo de entrada de la fase continúa.

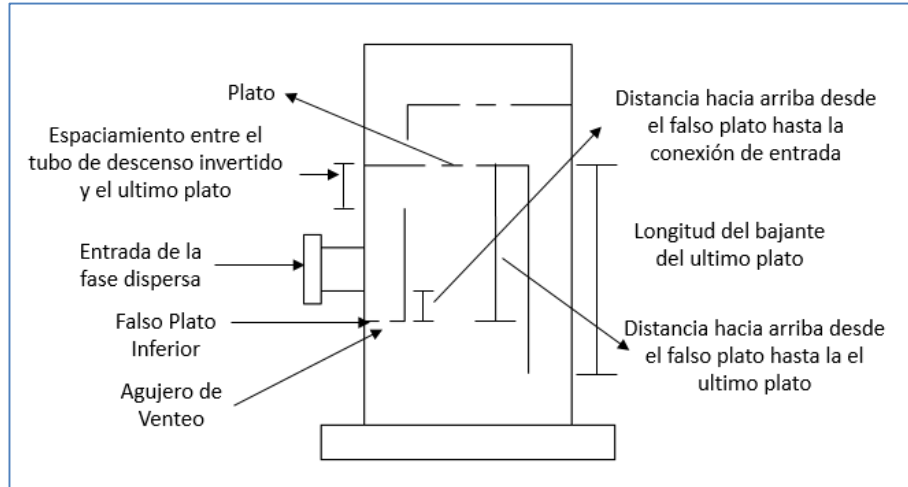


Fuente: Autor (Microsoft Visio 2013)

Para la entrada de la fase dispersa se realizaron los siguientes cálculos: el ancho del falso plato superior (h) es el mismo valor de la altura acorde al bajante calculado anteriormente, respecto al diámetro del agujero de venteo se colocó el mismo valor de los diámetros de orificios de los platos aunque cabe resaltar que este valor según el escalamiento da un resultado de 5,451 mm siendo este un valor extremadamente grande para el espacio con el que cuenta el falso plato.

La distancia hacia arriba desde el falso plato hasta la conexión de la entrada de la fase dispersa (superior) es el mismo valor de la distancia hacia abajo desde el falso plato hasta la conexión de entrada de la fase continua, la longitud del bajante del último plato es de 1.5 veces el valor de la longitud de cuerda del bajante L_{dc} , el espaciamiento entre el tubo de descenso invertido y el último plato es el mínimo valor del espacio libre (C_{in}) de la entrada de la fase continua con un valor de 10,483 mm, la longitud del bajante invertido del falso plato es la longitud de cuerda del bajante L_{dc} , con un valor de 184,022 mm y finalmente la distancia hacia arriba desde el falso plato hasta el último plato es la suma del espacio libre entre el tubo de descenso invertido del último plato y la longitud de cuerda del bajante L_{dc} . La figura 34 explica de una mejor manera los resultados mencionados.

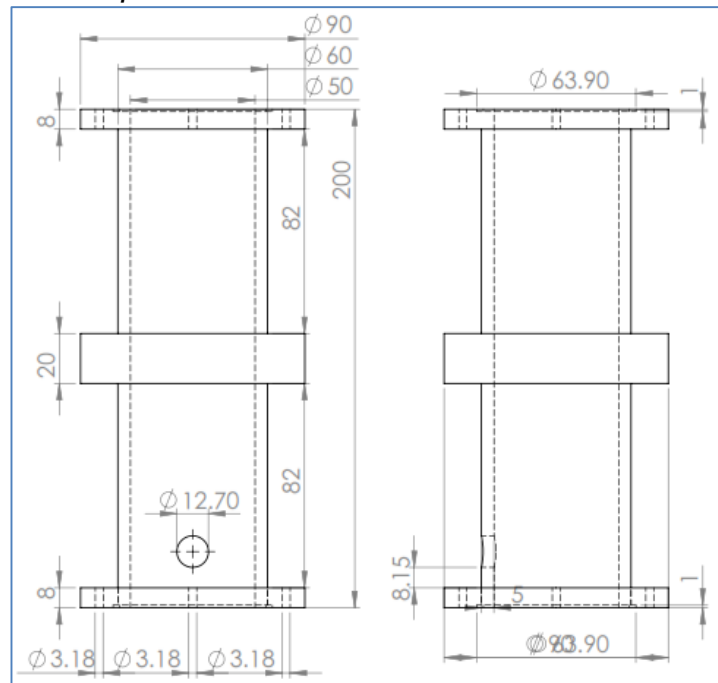
Figura 34. Especificaciones del módulo de entrada de la fase dispersa.



Fuente: Autor (Microsoft Visio 2013)

La figura 35 muestra los dos módulos de entrada de la fase dispersa y la dase continua de la torre los cuales tiene las mismas especificaciones que los 6 módulos anteriores, con la única diferencia que las entradas de las fases se encuentran ubicadas a 8.15 mm de una de las bridas, con un orificio del mismo diámetro para las conexiones de cada una.

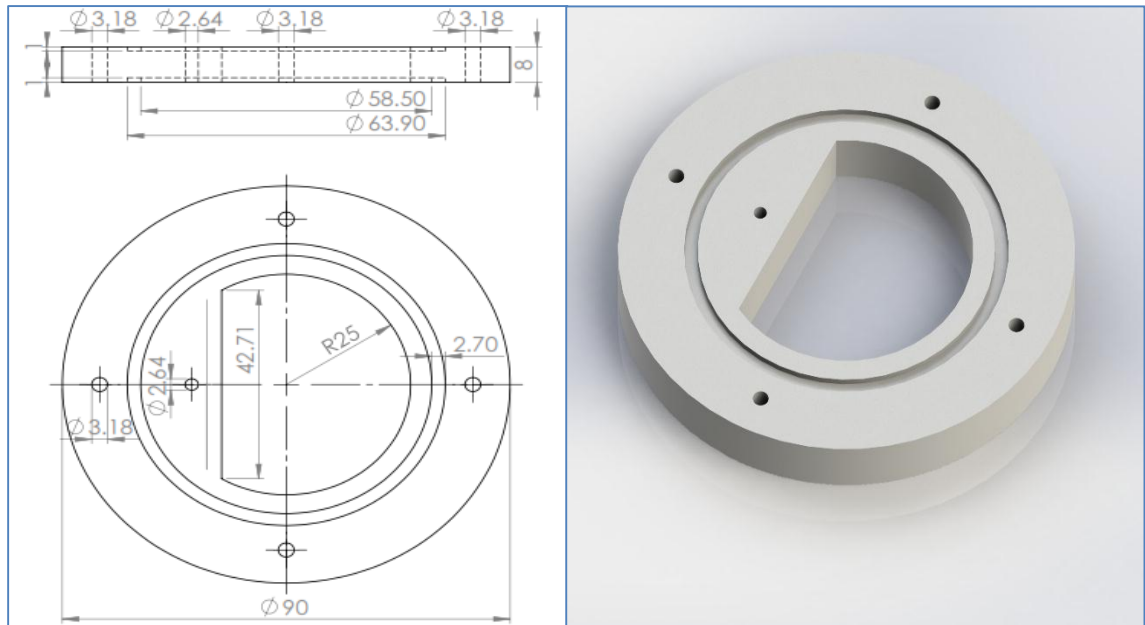
Figura 35. Especificaciones del módulo de entrada de la torre.



Fuente: Autor (Solidworks 2014)

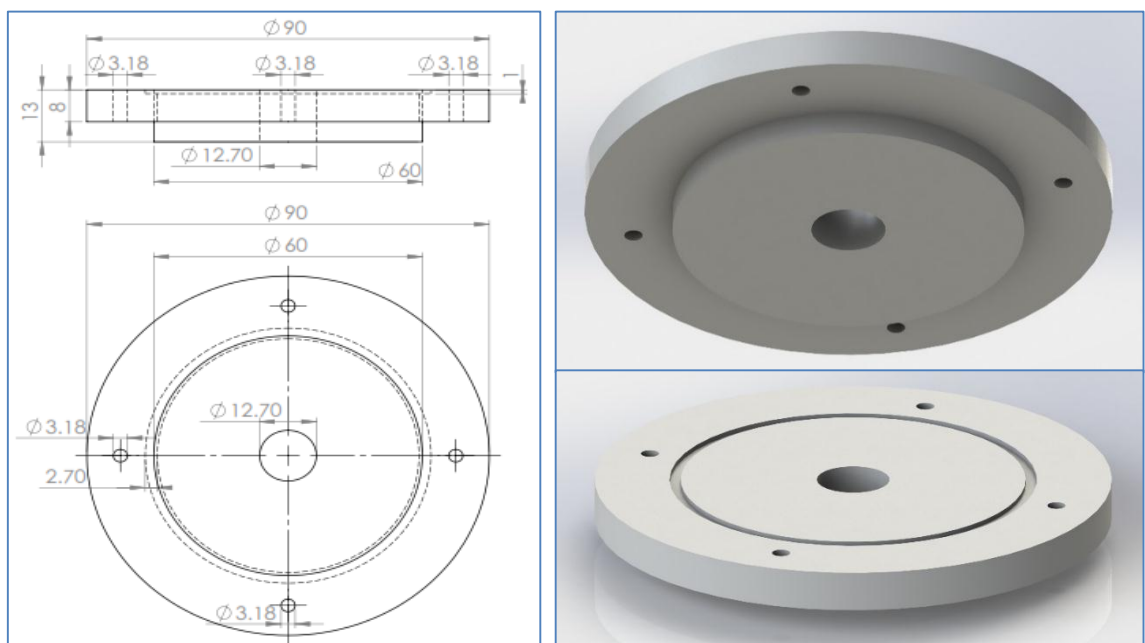
En cada entrada se colocó un falso plato de 8 mm de espesor y 25 mm de radio interno; la superficie del plato está limitada por una cuerda de 42,71 mm y tiene en el centro un orificio de 2,64 mm, tal como se puede observar en la figura 36. Además tiene las mismas especificaciones de las bridas con el fin de unir las secciones.

Figura 36. Especificaciones del falso plato.



Fuente: Autor (Solidworks 2014)

Figura 37. Especificaciones de las tapas para los módulos de entrada de la torre.

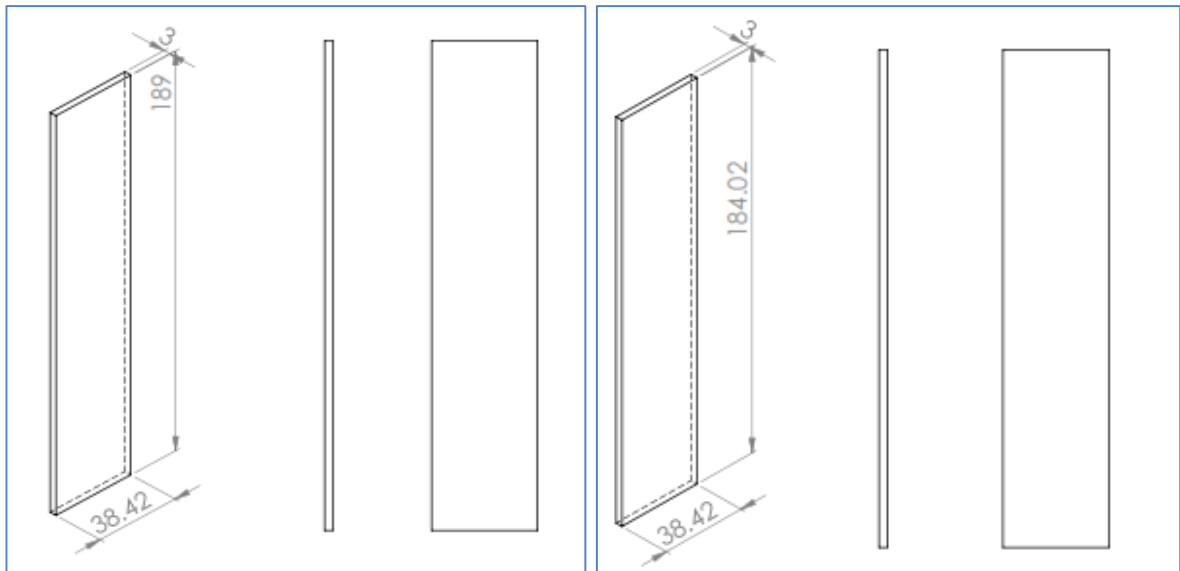


Fuente: Autor (Solidworks 2014)

En la cima y el fondo de la torre unido a los módulos de entrada se colocaron 2 tapas con las siguientes especificaciones: en el centro de la tapa hay un orificio para acople rápido de diámetro 12,7 mm, la tapa tiene un espesor de 8 mm en la brida y de 13 mm en la circunferencia interna donde está el orificio para la salida de extracto y refinado en cada caso. En la figura 37 se puede observar la especificación más detallada.

El bajante del falso plato que está en la parte inferior de la columna también tiene un espesor de 3 mm además cuenta con una altura un poco mayor que la de un bajante para un plato normal de 189 mm y un ancho de 38,42 mm. El bajante del falso plato superior es igual de alto que un bajante común y tiene el mismo espesor de 3 mm la diferencia es que el ancho de esta lámina es de 38,42 mm. En la figura 38 se pueden observar las dimensiones del bajante superior e inferior para cada entrada.

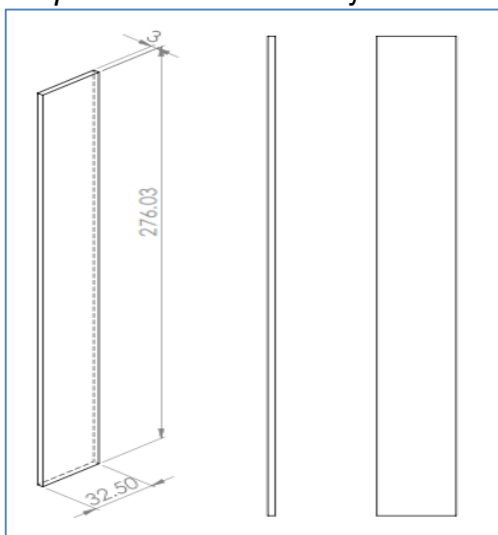
Figura 38. Bajantes: falso plato inferior (izquierda) y falso plato superior (derecha).



Fuente: Autor (Solidworks 2014)

Finalmente el bajante del último plato cuenta con un espesor de 3 mm, una altura de 276,03 mm y un ancho de 32,5 mm así como se muestra en la figura 39.

Figura 39. Especificaciones del bajante del último plato.



Fuente: Autor (Solidworks 2014)

En la parte de los anexos se puede observar con más detalle los planos de la columna de extracción ensamblada y de cada una de las piezas aquí descritas con las dimensiones mencionadas anteriormente.

4.3 DISEÑO DETALLADO DE LA COLUMNA DE EXTRACCIÓN

4.3.1 Diagrama de flujo de proceso

En el Anexo K se puede observar el diagrama de flujo de proceso con las especificaciones para cada uno de los equipos involucrados. Los cálculos para el balance de materia se detallan en el capítulo 5.

4.3.2 Requerimientos de servicios industriales

Los servicios industriales usualmente empleados son:

- Refrigeración
- Aire
- Vacío
- Gases Industriales

Los mencionados anteriormente no aplican para el prototipo de extracción líquido-líquido escala laboratorio.

4.3.2.1 Agua

Algunos sistemas ternarios toman una solución acuosa en la alimentación, preparada en el laboratorio utilizando Agua Destilada para tal fin. Ésta es

considerada como materia prima para el proceso, motivo por el cual no se tiene en cuenta para los requerimientos de servicios industriales.

Aclarando esto, el agua requerida para la operación de la columna se reduce a aquella que es utilizada en el procedimiento de lavado de la columna y sus sistemas complementarios.

4.3.2.2 Energía (Eléctrica, Térmica)

Dado que es un proceso adiabático sin requerimientos calóricos, no es necesario un sistema de suministro de energía térmica por vapor o combustible. La energía requerida para la extracción se limita a la utilizada por las bombas de alimentación de la fase ligera y la fase pesada en la columna.

4.3.2.3 Manejo de Efluentes

No se requiere el diseño de un sistema específico de drenaje para el manejo de los residuos químicos luego de la operación de la torre. Al operarse ésta en modo discontinuo, el extracto y refinado son retirados cuidadosamente de su interior, luego de ser analizados, y de recuperarse el solvente si es posible, se deben disponer en las líneas de residuos peligrosos del laboratorio de Operaciones Unitarias.

Los servicios industriales necesarios en el proceso, para cada uno de los equipos involucrados, se presentan en la tabla 15.

Tabla 15. Servicios Industriales.

Equipo	TAG	AGUA (lpm)			ENERGÍA (Kwh) Potencia Eléctrica	Descripción
		Contra incendios	Industrial	Lavado		
Tanque de mezcla	MIX-101	-	-	-	-	Almacenamiento: Solución de Alimentación
Tanque	TK-101	-	-	-	-	Almacenamiento: Solvente orgánico
Torre ELL	T-101	-	-	2.4	-	Operación: Columna de Separación
Bomba	P-101	-	-	-	5	Bomba para la fase continua
Bomba	P-102	-	-	-	5	Bomba para la fase dispersa
Tanque	TK-102	-	-	-	-	Almacenamiento: Extracto
Tanque	TK-103	-	-	-	-	Almacenamiento: Refinado

Fuente: Autor

4.3.3 Selección del material a usar en la torre

Para evaluar qué tipo de material es el más idóneo para las condiciones de proceso en una torre de extracción líquido-líquido, se realiza una comparación de cinco alternativas viables las cuales son mencionadas en el capítulo de metodología y su posterior evaluación usando el método Electra. A continuación se describe cada una de las alternativas para el desarrollo del método Electra.

1.1.3.1 Alternativa 1: Polimetilacrilato (Acrílico)

El polimetilmetacrilato, es uno de los plásticos de ingeniería. La placa de acrílico se obtiene de la polimerización del metacrilato de metilo y la presentación más frecuente que se encuentra en la industria del plástico es en gránulos o en placas. Los gránulos son para el proceso de inyección o extrusión y las placas para termoformado o para mecanizado. Compite en cuanto a aplicaciones con otros plásticos como el policarbonato o el poliestireno, se destaca frente a otros plásticos transparentes en cuanto a resistencia a la intemperie, transparencia y resistencia al rayado. En la tabla 16 se pueden ver algunas ventajas y desventajas del polipropileno:

Tabla 16. Ventajas y desventajas del Polimetilacrilato.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Es un Termoplástico duro, resistente, transparente, de excelentes propiedades ópticas con alto índice de refracción, buena resistencia al envejecimiento y a la intemperie[30].	En cuanto a sus inconvenientes el principal de ellos es su elevado coste, que junto al tipo de estructura requerida hacen que las construcciones con este material sean de costes elevados.
Su resistencia a la rotura es siete veces superior a la del cristal, por lo que resulta más resistente a los golpes.	El metacrilato es fácil de rallar con cualquier instrumento, con lo que habrá que considerar este aspecto como factor negativo.
La transparencia de este plástico está comprendida entre el 85 y el 92%, por lo que deja pasar casi todos los rayos UV y su poder de difusión es casi nulo. Su duración es mayor que la del poliéster.	El metacrilato también presenta gran resistencia al ataque de muchos compuestos pero es atacado por otros, entre ellos: acetato de etilo, acetona, ácido acético, ácido sulfúrico, alcohol amílico, bencol, butanol, diclorometano, cloroformo, tolueno y etanol.
A pesar de su ligereza puede soportar una sobrecarga de 70 kg/m ² .	
Es un material ligero con una densidad de 1,19 kg/m ³ . Presenta buena resistencia mecánica y estabilidad.	

Fuente: Schwarcz, J., *The Right Chemistry: 108 Enlightening, Nutritious, Health-Conscious and Occasionally Bizarre Inquiries into the Science of Daily Life*. 2012

1.1.3.2 Alternativa 2: Polipropileno de alta densidad (HDPE)

El polipropileno es un polímero termoplástico, parcialmente cristalino, que se obtiene de la polimerización del propileno, es utilizado en una amplia variedad de aplicaciones que incluyen empaques para alimentos, tejidos, equipo de laboratorio, componentes automotrices y películas transparentes. Se denomina homopolímero al Polipropileno obtenido de la polimerización de propileno puro siendo el tipo más común el polipropileno isotáctico donde la distribución regular de los grupos metilo le otorga una alta cristalinidad entre 70 y 85%, gran resistencia mecánica y gran tenacidad. Es el tipo de plástico más utilizado hoy día en inyección de piezas y en extrusión de película plana. En la tabla 17 podemos observar algunas ventajas y desventajas que presenta el polipropileno.

Tabla 17. Ventajas y desventajas del Polipropileno.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Es compatible con la mayoría de las técnicas de procesamiento existentes y usado en diferentes aplicaciones comerciales, como industria automotriz, textiles, medicina, tuberías, etc.	Es frágil a baja temperatura, sensible a los rayos UV, menos resistente a la oxidación que el polietileno y difícil de pegar.
Es el material plástico de menor peso específico (0,9 g/cm ³), lo que implica que se requiere de una menor cantidad para la obtención de un producto terminado.	Su producción en masa es una fuente de impactos ambientales por el consumo de petróleo y las emisiones, haciendo difícil o imposible su reciclaje de manera rentable.
Evita el traspaso de humedad, lo cual puede ser utilizado para la protección de diversos alimentos.	La resistencia de polipropileno se puede mejorar mediante la mezcla con elastómeros[31].
Buenas propiedades organolépticas, químicas, de resistencia y transparencia.	El progreso de diseño ecológico en los plásticos podría facilitar la clasificación y reciclado de este material.

Fuente: ARLIE, J., *Commodity Thermoplastics*, París: Editions Technip. 1990, ISBN 2-7108-0591-X

1.3.3.3 Alternativa 3: Politetrafluoroetileno (PTFE)

El politetrafluoroetileno, más conocido como Teflón, es un polímero similar al polietileno, en el que los átomos de hidrógeno han sido sustituidos por átomos de flúor. Una aplicación del politetrafluoroetileno es el tratamiento de alfombras y telas para hacerlas resistentes a las manchas. Y lo que es más, es también muy útil en aplicaciones médicas. Dado que el cuerpo humano raramente lo rechaza, puede ser utilizado para hacer piezas artificiales del cuerpo. En la tabla 18 se puede ver una comparación entre algunas ventajas y desventajas presentes en el Politetrafluoroetileno

Tabla 18. Ventajas y desventajas del politetrafluoroetileno.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Es resistente a los agentes químicos. Mayormente inerte y también a los solventes además de ser insoluble en cualquier solvente hasta los 300° C.	Su densidad de 2,4 g/cm ³ es muy elevada lo que junto a su precio, también elevado, lo hacen un producto caro por su volumen usado
El coeficiente de conductividad térmica es relativamente bajo, por lo que puede considerarse como un buen aislante. El agregado de cargas aumenta la conductividad térmica[32].	Tiene el gran inconveniente de su baja resistencia a la compresión, siendo inservible en muchos casos por el excesivo tamaño de los soportes
Es uno de los materiales plásticos térmicamente más estables. A 260° C no existe descomposición apreciable.	La implementación es difícil e inusual: no se puede elaborar en estado fundido, que se forma por un método de sintetización.
Es resistente a la flexión y no se rompe	

Fuente: Kaplan et. al, *Plasma processes and adhesive bonding of polytetrafluoroethylene*. Surface and interface analysis.

1.3.3.4 Alternativa 4: Vidrio de Borosilicato

Vidrio de borosilicato es un tipo particular de vidrio con óxidos de silicio y boro, más conocido con el nombre de vidrio Pyrex. Además del silicio, el carbonato de sodio y el carbonato de calcio usados en la fabricación de vidrios, se agrega el boro en la manufactura de este vidrio. Normalmente su composición es: 70% sílice, 10% óxido bórico, 8% óxido de sodio, 8% óxido de potasio, 1% óxido de calcio y 2% óxido de aluminio. Aunque es más difícil de hacer que el vidrio tradicional, es económico producirlo por su durabilidad y su resistencia calórica y química. Encuentra un excelente uso en el equipamiento de laboratorios de química, cocina, iluminación y, en ciertos casos, ventanas. Algunas ventajas y desventajas generales del vidrio pyrex se presentan en la tabla 19.

Tabla 19. Ventajas y desventajas del vidrio Borosilicato.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Es resistente a los choques térmicos sin deformarse (no se deforma por debajo de 550°C), gracias al Anhídrido Bórico (B ₂ O ₃) muy superior a los sodocálcicos (SiO ₂ -CaO-Na ₂ O).	Es casi imposible repararlo una vez que se ha roto aunque sea una parte y su costo de reparación es grande, además de ser relativamente pesados.
Tiene resistencia química Al agua, ácidos (menos al ácido fluorhídrico y fosfórico caliente), soluciones de sal y disolventes orgánicos.	Son frágiles y no soportan saltos térmicos muy grandes, además no se puede aplicar fuerza sobre tapones o llaves de vidrio.

Fuente: <http://www.ictsl.net/productos/propiedadestecnicas/021b079654102b433>

Tabla 19. (Continuación)

VENTAJAS	DESVENTAJAS
El incremento en su volumen es muy bajo a medida que aumenta su temperatura y puede construirse con paredes gruesas para dar mayor fuerza mecánica.	No se debe conservar soluciones concentradas de bases en material de vidrio de borosilicato.

Fuente: <http://www.ictsl.net/productos/propiedadestecnicas/021b079654102b433/>

1.3.3.5 Alternativa 5: Aluminio

El aluminio es un elemento químico de símbolo Al, es el tercer elemento más común encontrado en la corteza terrestre. Los compuestos de aluminio forman el 8 % de la corteza de la tierra y se encuentran presentes en la mayoría de las rocas, de la vegetación y de los animales. Como metal se extrae únicamente del mineral conocido con el nombre de bauxita, por transformación primero en alúmina mediante el proceso Bayer y a continuación en aluminio metálico mediante electrólisis[33]. En la tabla 20 se presentan algunas ventajas y desventajas del aluminio respecto a varios factores.

Tabla 20. Ventajas y desventajas del aluminio.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
No se oscurece en presencia de compuestos azufrados y su apariencia externa brillante y atractiva.	Es un elemento químico que se puede considerar “nocivo” ya que causa una serie de enfermedades por su excesivo uso como: cáncer al estómago, Alzheimer, entre otros.
Es impermeable a los gases y a la luz y puede ser sometido a una amplia gama de temperaturas.	Algunas veces presenta dificultad de las uniones con el propio aluminio o con otros materiales, a no ser con tornillos o remaches.
Su peso es más ligero y tiene alta resistencia a la corrosión atmosférica.	Los envases se pueden deformar o deteriorar durante su manejo Reducción de la vida de anaquel de los productos envasados en ellos.
Su costo es bajo y al no poseer costura lateral se ahorra material.	Producir aluminio es energético caro, y requiere una enorme cantidad de bauxita (4 toneladas por cada tonelada de aluminio), un mineral escaso.
Es dúctil y da una buena protección mecánica.	Necesidad del uso de espesores mayores que con la hojalata incrementa su costo.
Se puede combinar con otros materiales formando aleaciones.	Baja resistencia mecánica.

Fuente: *Enciclopedia de Ciencia y Técnica. Tomo 1, Aluminio. Salvat . 1984*

1.3.3.6 Aplicación del Método ELECTRE

Tabla 21. Comparación de Alternativas.

FACTORES	RESISTENCIA QUÍMICA	COSTOS	PROPIEDADES DEL MATERIAL
Alternativa 1	Tiene baja resistencia a los compuestos químicos	Costos elevados debido al moldeo del material	Presenta buenas características mecánicas y de estabilidad
Alternativa 2	Tiene buena resistencia a los compuestos químicos	Costos altos debido al mecanizado del material	Presenta excelentes características mecánicas, térmicas y de estabilidad
Alternativa 3	Tiene excelente resistencia a los compuestos químicos	Costos elevados debido al manejo del material	Presenta excelentes características mecánicas, térmicas y de estabilidad
Alternativa 4	Tiene excelente resistencia a los compuestos químicos	Costos elevados debido al manejo del material	Presenta excelentes características mecánicas y de estabilidad
Alternativa 5	Tiene buena resistencia a los compuestos químicos	Costos altos debido al manejo del material	Presenta buenas características mecánicas y de estabilidad

Fuente: Autor

Tabla 22. Ponderación de los factores de comparación.

FACTOR	PONDERACIÓN (%)
Resistencia Química	43
Costo Inicial	36
Propiedades del material	21
Vector de pesos (0.43, 0.36, 0.21)	

Fuente: Autor

Tabla 23. Análisis de importancia.

Factores	RESISTENCIA QUÍMICA	COSTOS	PROPIEDADES DEL MATERIAL
A1	3	2	5
A2	6	4	8
A3	7	2	6
A4	8	1	7
A5	5	3	5

Fuente: Autor

Tabla 24. Matriz de concordancia.

0	0	0	0.10979897	0
0.27959104	0	0.1842315	0.1842315	0.27959104
0.27959104	0.09535954	0	0.10979897	0.27959104
0.16979207	0.09535954	0.16979207	0	0.16979207
0.16979207	0	0	0.10979897	0

Fuente: Autor

Tabla 25. Matriz de discordancia.

-	1	1	1	1
0.36566462	-	0.28949738	0.28949738	0.19299826
0.25115163	1	-	0.28949738	0.2390175
0.34542627	1	1	-	0.57571044
0	1	1	1	-

Fuente: Autor

Tabla 26. Análisis de Dominancias.

	Dominancia por fila	Dominancia por columna	Diferencia de priorización	Priorización
A1		A2,A3,A4,A5	-4	5° lugar
A2	A1,A3,A4,A5	-	4	1° lugar
A3	A1,A4,A5	A2	2	2° lugar
A4	A1,A5	A2,A3	0	3° lugar
A5	A1	A2,A3,A4	-2	4° lugar

Fuente: Autor

Al realizar el análisis de selección de alternativas (tabla 21 a 26) para el material del cilindro principal que constituye el cuerpo de la columna y los accesorios internos, la alternativa 2 domina a las demás. Debido a la estabilidad térmica, baja reactividad química con solventes orgánicos, disponibilidad en el mercado, facilidad de corte y mecanizado, y el precio razonable de adquisición, se ha preferido el Polipropileno de alta densidad (HDPP) para la fabricación de las secciones que componen la columna de extracción líquido-líquido, y los accesorios internos necesarios para su operación.

4.3.4 Sistemas complementarios

4.3.4.1 *Determinación de la capacidad volumétrica del equipo de extracción*

Para la selección eficaz de una medida de caudal en un proceso de extracción es necesario un conocimiento práctico de las tecnologías de medida, además de un profundo conocimiento del proceso y del fluido que se quiere medir. Saber la medida del caudal utilizado en un proceso nos proporciona el consumo del fluido, este valor tiene que ser lo más preciso posible, debido a que se tiene en cuenta el valor económico del fluido que pasa a través del medidor. Entre los principales medidores usados para el cálculo del caudal están los medidores de presión diferencial, los medidores con accionamiento mecánico y los medidores de tipo turbina, para finalizar con los medidores de caudal de tipo electromagnético y los medidores de tipo ultrasónico [34].

En el caso de la medida del caudal para el diseño de la torre de extracción líquido-líquido a escala laboratorio planteado anteriormente se realizó de forma experimental tomando el tiempo en el cual se llenó la columna de extracción y el volumen de la entrada de la fase ligera y la entrada de la fase pesada obteniendo como resultado 28,8857 y 13,2857 L/h respectivamente. La recomendación respecto al tiempo de retención en una torre de extracción a escala laboratorio es de 3 a 4 minutos sobre la entrada superior, 2 minutos en el tope de la columna y 10 minutos en el fondo, siendo el tiempo total de la operación entre 15 o 16 minutos [35] dependiendo del volumen inicial de cada fase se calcula el caudal respectivo.

1.3.4.2 *Capacidad requerida en los tanques de almacenamiento:*

➤ Tanque de mezcla de la alimentación

En este tanque se prepara la disolución acuosa de etanol, que formará la fase dispersa para la alimentación de la columna. Este tanque tiene forma cúbica, además el tiempo de vaciado del fluido dentro del tanque será de aproximadamente 5 minutos. El material que se debe emplear para la construcción del tanque de mezcla es el polipropileno, resistente a los compuestos químicos y con un costo económicamente rentable. Teniendo en cuenta el caudal de salida del tanque y el tiempo de espera del fluido, el tanque debería tener un volumen de seguridad un 10% mayor al máximo requerido, que en el caso de la torre de extracción tiene un volumen óptimo de 4L, sin incluir los fondos.

➤ Tanques de almacenamiento del solvente

Se diseñan el tanque de almacenamiento para el disolvente de extracción que entra a la columna. Su material al igual que el tanque de mezcla, es polipropileno. Para obtener las dimensiones óptimas del recipiente se recomienda llevar a cabo el procedimiento mencionado en el "Manual de recipientes a presión" (por el que se estima la relación entre altura y el espesor de los tanques[36]. Como el proceso está diseñado para que funcione en continuo durante 15 minutos, se debe tener en cuenta el caudal de salida del tanque, el tiempo de vaciado del fluido y que el tanque debe tener un volumen de seguridad de un 10% mayor al máximo alcanzado, en el

caso de la columna de extracción se obtiene un volumen óptimo de 4L, sin incluir los fondos.

➤ **Tanque de almacenamiento del líquido extracto y refinado**

Para los productos de extracto y refinado finales se incluirán tanques integrados en la unidad del proceso de extracción, cuya carga estará limitada a la necesaria para la continuidad del proceso de la siguiente manera: Teniendo en cuenta el caudal de salida del tanque, el tiempo de vaciado del fluido y que el tanque debe tener un volumen de seguridad de un 10% mayor al máximo alcanzado, se obtiene un volumen óptimo de 4L, sin incluir los fondos.

1.3.4.3 Sistemas de conducción de líquido

Para el transporte de un fluido de un equipo a otro se deben usar líneas de distribución que garantizan el soporte en cuanto a presión, caudal y temperatura de los distintos fluidos a circular dentro del proceso. Para ello se utilizan tuberías, cuya función es el transporte del fluido; accesorios, que aseguran el buen funcionamiento de las tuberías y sistemas de impulsión (bombas), encargados de suministrar energía al fluido para transportarlo a distintos puntos de altura del proceso con las características deseadas. Se recomienda usar tuberías de Politetrafluoroetileno, material que se usa comúnmente para las tuberías en una torre de extracción líquido-líquido a escala laboratorio debido a su resistencia química. En el caso de la torre se usaron mangueras comerciales de 5 mm de diámetro, debido a que las mangueras de politetrafluoroetileno son de difícil adquisición.

La distribución del sistema de conducción se divide en varias líneas de proceso. Se han descartado las líneas de servicios auxiliares como son las líneas de toma de muestras en cada etapa de la torre. Los diferentes tramos o líneas de conducción de la planta son:

- Línea 1. Conduce la alimentación desde el tanque de mezcla hasta la entrada lateral en la parte inferior de la columna.
- Línea 2. Conduce el líquido del tanque de almacenamiento del disolvente de extracción hasta la entrada lateral en la parte superior de la columna.
- Línea 3. Conduce el líquido refinado desde la salida de la parte superior de la columna hasta su tanque de almacenamiento.
- Línea 4. Conduce el líquido extracto desde la salida de la parte inferior de la columna hasta su tanque de almacenamiento.

1.3.4.4 Selección de las bombas de alimentación según el caudal de entrada:

Para el impulso y el transporte de los fluidos son imprescindibles los sistemas de impulsión, o bombas. Hay que tener en cuenta la conveniencia de que las bombas en la instalación sean de igual tipo y marca, pues de esta forma la inversión en piezas de repuesto para el mantenimiento disminuye, en la torre de extracción se diferencian dos líneas de bombeo. Las líneas son las siguientes:

- Línea 1, o de alimentación. Impulsa el fluido de alimentación desde el tanque de mezclado hasta su entrada en la columna de extracción.
- Línea 2, o de disolvente de extracción. Impulsa el fluido desde el tanque de almacenamiento de este hasta su entrada en la columna de extracción.

La elección del tipo de bomba que se va a utilizar para las entradas a la torre debe depender de las características del fluido y de la conducción en la que se encuentre. Para el caso que se estudia se puede elegir entre dos tipos de bombas fundamentales:

- Las bombas de desplazamiento positivo o bomba reciprocantes son aquellas cuyo principio de funcionamiento está basado en la hidrostática, de modo que el aumento de presión se realiza por el empuje de las paredes de las cámaras que varían su volumen, además presentan una excelente resistencia química.
- Las bombas centrífugas son aquellas cuyo funcionamiento está basado en el intercambio de cantidad de movimiento entre la máquina y el fluido, aplicando la hidrodinámica. En este tipo de bombas hay uno o varios rodets con álabes que giran generando un campo de presiones en el fluido. El movimiento del fluido sigue una trayectoria perpendicular al eje del rodete impulsor. En este tipo de máquinas el flujo del fluido es continuo. Estas bombas son las más utilizadas en la industria por su gran versatilidad, sencillez y reducido tamaño, además es satisfactoria para la impulsión de fluidos en un amplio rango de caudales y son recomendables para manejar fluidos poco viscosos y a presiones bajas.

Las bombas seleccionadas para las líneas de alimentación son las siguientes:

Bomba 1. Es la bomba encargada de impulsar la alimentación hasta la entrada lateral de la parte inferior de la columna. Se recomienda utilizar una bomba centrífuga de aspiración sencilla, pues estas características la sitúan en el rango de aplicación.

Bomba 2. Es la bomba encargada de impulsar el disolvente de extracción hasta su entrada en el lateral de la parte superior de la columna. Se recomienda utilizar una bomba recíprocante o una bomba centrífuga de aspiración sencilla.

En el caso de la torre se seleccionaron bombas comerciales que cumplieran con las condiciones de alimentación requeridas, debido a que las bombas mencionadas anteriormente presentan un costo elevado de adquisición, por este motivo como recomendación se hace el llamado de la compra y adquisición de bombas centrífugas o reciprocantes para el uso adecuado de la torre.

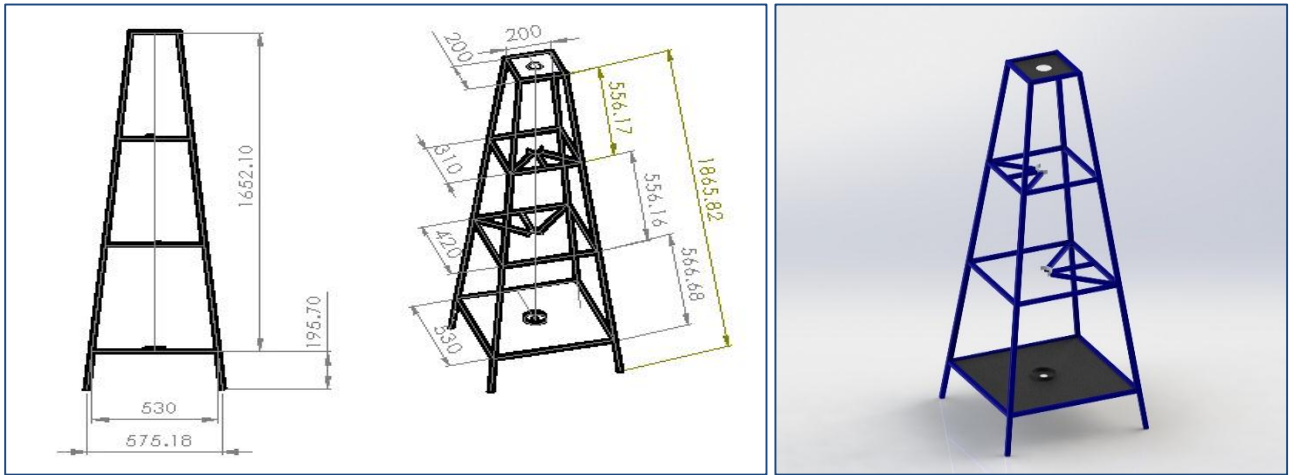
1.3.4.5 Selección de los accesorios para muestreo y disposición de estos en la columna

Los accesorios que se usaron en la torre de extracción para obtener muestras en cada una de las etapas y para las entradas de alimentación y disolvente de extracción, y también para las salidas de extracto y refinado en la columna, fueron acoples rápidos de aire (rosca hembra) a espiga manguera de ¼ pulg, los acoples de las entradas y salidas están conectados con cada una de las líneas de conducción mencionadas anteriormente, así como también lo están a secciones de mangueras del mismo tipo, para obtener las muestras en cada una de las etapas, Esto con el fin de que las muestras por etapas no se contaminen; de igual forma se recomienda adquirir acoples de aluminio o plástico, debido a que los acoples de bronce se pueden oxidar con el tiempo de uso de la torre[37].

1.3.4.6 Diseño de la estructura de soporte para la columna de extracción:

Para sostener la torre también se diseñó una base en forma piramidal de 600 mm cuadrados, la cual está compuesta por dos placas la primera tiene un valor de 528,82 mm², en el centro cuenta con una arandela de 95 mm de diámetro y 20 mm de altura y una abertura en el centro de la placa de 30 mm de diámetro, esta placa está situada a 200 mm del suelo además, tiene un espesor de 3 mm. A 567 mm por encima de la placa se observa un marco de refuerzo el cual tiene tres brazos que sostienen una arandela en forma de media luna de 60 mm de diámetro para sostener los esfuerzos radiales aplicados al tubo durante su operación, evitando flexiones en las uniones entre módulos. La placa situada en la cima de la base es de 200 mm² y está separada en dos secciones del mismo tamaño cada una, en el centro de la placa hay un orificio con un diámetro de 60 mm en el cual se ajusta la tapa superior de la torre, también se puede observar cuatro perforaciones con el fin de atornillar ésta placa a la estructura piramidal principal, a 556 mm por debajo de esta pequeña placa se sitúa un marco parecido al mencionado anteriormente con una orientación opuesta, esto se hace con el fin de amortiguar la fuerza que los acoples rápidos realizarán en la torre. En la siguiente figura se puede detallar de manera más clara la forma que se diseñó la estructura de la torre.

Figura 40. Dimensiones de la estructura de soporte de la columna.



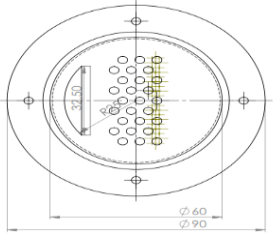
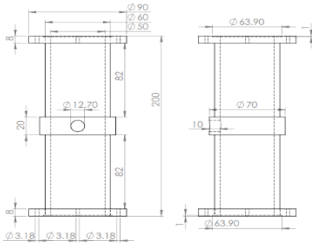
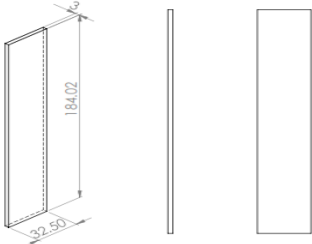
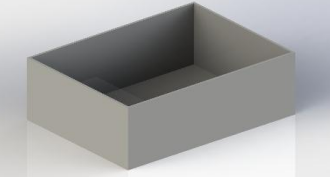



Fuente: Autor

4.3.5 Hoja de especificaciones del equipo de extracción

La hoja de datos técnicos de la columna de extracción líquido-líquido se puede observar en la tabla 27.

Tabla 27. Datasheet equipo de extracción líquido-líquido.

	UNIVERSIDAD DE PAMPLONA Facultad de Ingenierías y Arquitectura <i>Ingeniería Química</i>		 Universidad de PAMPLONA La Academia al servicio de la Vida
	EQUIPO	T-101	
	Columna de Extracción Líquido-Líquido		
	Ubicación Física		
Diseño del plato			
Espesor del plato Diámetro de orificios Número de orificios Espaciamiento triangular de orificios Longitud de cuerda Altura acorde del bajante	8 mm 3 mm 27 2.58 mm 32.5 mm 6.02 mm		
Material			
Polipropileno de Alta Densidad			
Dimensiones de la columna			
Diámetro interno Altura por etapa Espesor del cilindro Tipo de cabezal Espesor del cabezal (tapa) Número total de módulos	5 mm 200 mm 5 mm Planos 13 mm 8		
Material			
Polipropileno de Alta Densidad			
Diseño del derramadero o bajante			
Espesor del bajante Longitud del bajante Ancho (longitud de cuerda) Longitud bajante último plato Longitud bajante falso plato Ancho bajante falso plato	3 mm 184 mm 32.5 mm 276 mm 189 mm 38.42 mm		
Material			
Polipropileno de Alta Densidad			
Accesorios			
Tanques de almacenamiento			
Capacidad volumétrica	4 L		
Lado	170 mm		
Altura	150 mm		
Material			
Polipropileno			
Acoples rápidos			
Diámetro nominal Acople Rápido	6.35 mm		
Diámetro nominal Espiga	6.35 mm		
Material			
Bronce, Acero			
Notas			
Capacidad volumétrica de la columna: 3300 mL			

Fuente: Autor

4.4 ANÁLISIS DE TRABAJO SEGURO

El análisis de trabajo seguro es una lista de chequeo elaborada a partir del procedimiento que se lleva a cabo dentro de un proceso. Como primera se elabora una lista de actividades fundamentales del proceso, dentro de cada una de ellas se enumeran las etapas del trabajo realizado, teniendo en cuenta el riesgo potencial y las observaciones pertinentes según la naturaleza de la operación. Se hace un análisis cualitativo de cada uno de estos riesgos, estableciendo las posibles causas que lo generan y las consecuencias que puede traer sobre la salud y seguridad del operario. Luego de elaborar la identificación de los riesgos presentes en cada etapa de trabajo, en la siguiente tabla se formula una serie de recomendaciones, acciones o medidas preventivas que deben tenerse en cuenta para un procedimiento de trabajo seguro.

Tabla 28. Análisis de riesgos.

Nombre del trabajo	Análisis de Procedimiento de Trabajo Seguro			
Realizado por	Cristian David Bravo Sanchez Jenny Yurley Maldonado Arias	Especialidad	Ingeniería Química	
Personal ejecutante	Auxiliar de Laboratorio Docente a cargo	Fecha	1 de diciembre de 2016	
Equipo y/o herramienta	Manos, destornilladores, llave adaptable para sujetar, llave combinada ¼ pulg.			
Equipo de protección personal	Guantes de nitrilo, Tapabocas, Bata de Laboratorio, Gafas de Protección			
ETAPA DEL TRABAJO	RIESGO POTENCIAL	CAUSA POSIBLE	CONSECUENCIA	MEDIDAS DE CONTROL
ACTIVIDAD 1.	Operación del prototipo de Extracción Líquido-Líquido			
1. Preparar la Solución de Alimentación	Intoxicación por sustancias. Irritación de la piel por contacto con sustancias químicas. Irritación de la vista por salpicaduras.	No utilizar los elementos de protección personal (EPP).	Dermatitis de contacto. Dificultades respiratorias. Afecciones oculares leves.	Exigir el uso de los Elementos de Protección Personal. Estricta supervisión del docente a cargo.
2. Llenar los tanques de alimentación y solvente orgánico.	Caídas del mismo nivel. Intoxicación por sustancias. Irritación de la piel por contacto con sustancias químicas.	Uso de calzado inapropiado. Adopción de posturas incorrectas para el transporte de sustancias. No utilizar los elementos de	Posibles traumas y contusiones por caídas. Dermatitis de contacto. Dificultades respiratorias. Afecciones oculares leves.	Tener la zona de circulación despejada, limpia y seca. Exigir el uso de los Elementos de Protección Personal. Estricta supervisión del docente a cargo.

	Irritación de la vista por salpicaduras.	protección personal (EPP).		
ETAPA DEL TRABAJO	RIESGO POTENCIAL	CAUSA POSIBLE	CONSECUENCIA	MEDIDAS DE CONTROL
3. <i>Conectar las bombas de alimentación</i>	Posibilidad de contacto eléctrico	Uso de calzado inapropiado Mal estado de las conexiones de las bombas	Contracción espasmódica muscular. Parálisis respiratoria. Quemaduras.	Realizar la inspección de tomas de corriente, conexiones, y cables. Portar calzado adecuado.
4. <i>Encender las bombas de alimentación</i>	Derrame del líquido	Ubicación inadecuada de la bomba, causando inestabilidad en el tanque.	Dermatitis de contacto. Intoxicación por inhalación.	Exigir el uso de los Elementos de Protección Personal. Estricta supervisión del docente a cargo.
5. <i>Muestreo</i>	Intoxicación por sustancias. Irritación de la piel por contacto con sustancias químicas. Irritación de la vista por salpicaduras.	No utilizar EPP. Manipular inadecuadamente los accesorios para muestreo.	Dermatitis de contacto. Intoxicación por inhalación.	Realizar el muestreo entre dos personas. Preparar recipientes marcados para recolectar las muestras. Exigir el uso de los Elementos de Protección Personal. Estricta supervisión del docente a cargo.
6. <i>Descarga de la Torre</i>	Derrame de líquido. Intoxicación por sustancias. Irritación de la piel por contacto. Irritación de la vista por salpicaduras.	No utilizar EPP. Manipular inadecuadamente las conexiones de entrada y salida de la torre.	Dermatitis de contacto. Dificultades respiratorias. Afecciones oculares leves.	Exigir el uso de los Elementos de Protección Personal. Estricta supervisión del docente a cargo.
ACTIVIDAD 2	Lavado de la columna de extracción con Agua Destilada			
1. <i>Llenar los tanques de alimentación y solvente con agua destilada</i>	Caídas del mismo nivel. .	Uso de calzado inapropiado. Adopción de posturas incorrectas para el transporte de sustancias.	Posibles traumas y contusiones por caídas. .	Tener la zona de circulación despejada, limpia y seca. Estricta supervisión del docente a cargo.

2. <i>Conectar las bombas de alimentación</i>	Posibilidad de contacto eléctrico	Uso de calzado inapropiado Mal estado de las conexiones de las bombas	Contracción espasmódica muscular. Parálisis respiratoria.	inspección de tomas de corriente, conexiones, y cables.
ETAPA DEL TRABAJO	RIESGO POTENCIAL	CAUSA POSIBLE	CONSECUENCIA	MEDIDAS DE CONTROL
3. <i>Encender las bombas de alimentación</i>	Derrame del líquido	Ubicación inadecuada de la bomba, causando inestabilidad en el tanque.	Posibles traumas por caídas debido al piso mojado.	Tener la zona de operación del equipo despejada, limpia y seca. Estricta supervisión del docente a cargo.
4. <i>Descarga de la Torre</i>	Derrame de líquido.	No utilizar EPP. Manipular inadecuadamente las conexiones de entrada y salida de la torre.	Posibles traumas por caídas debido al piso mojado.	Exigir el uso de los Elementos de Protección Personal. Estricta supervisión del docente a cargo.
5. <i>Desconexión, limpieza de los acoples y nueva instalación.</i>	Caída de objetos en manipulación y/o herramientas mal ubicadas.	Adoptar posturas incorrectas. Manipulación inadecuada de la herramienta. Heridas superficiales por accidentes con las herramientas.	Traumas, heridas, contusiones leves, en algunos casos graves.	La desconexión de los acoples debe ser realizada por el auxiliar de laboratorio o el docente a cargo.

Fuente: Autor

4.5 ESTIMACIÓN DE COSTOS Y PRESUPUESTO DEL PROTOTIPO

La viabilidad económica de un proyecto, en este caso, el diseño de un equipo, es un aspecto fundamental para dar paso a su implementación, es por esto que se debe conocer el valor monetario de llevar a cabo las ideas concretadas en etapas anteriores del diseño.

4.5.1 Estimación de costos una columna comercial de extracción a escala laboratorio

En este apartado se realiza un estudio estimativo de los costos de adquisición de una columna comercial de extracción líquido-líquido a escala laboratorio. Se muestran los cálculos para estimar la inversión necesaria para elaborar el cuerpo principal y los accesorios internos en acero al carbono, así como la inversión requerida para adquirir el equipo de separación y los sistemas necesarios para su óptima operación.

A continuación se presenta la estimación de costos del cuerpo principal de la columna mediante el Método de Coste Modular [38], que tiene en cuenta las propiedades del material, y la capacidad del equipo para obtener el valor estimado de la inversión requerida para el módulo seleccionado.

Los equipos principales del proceso que son tenidos en cuenta son:

- Columna de extracción
- Platos perforados

4.5.1.1 Costo de la columna de extracción (sin platos)

Se analiza el cuerpo principal del equipo con las medidas obtenidas en la etapa de diseño, y una presión de operación de 583 mmHg. Este recipiente tiene 1,6775 m de altura y un diámetro externo de 0,05 m.

En primer lugar se calcula un factor de presión para recipientes de proceso, así:

$$F_p = \frac{(P + 1) * D}{2 * [850 - 0.6 * (P + 1)]} + 0.00315 \quad (35)$$

0.0063

Donde P es el valor de la presión, que para el caso es de 0.7773 bar y D, el diámetro interno del recipiente, de 0.05 m.

Al aplicar la ecuación (35), se obtiene un $F_p=0.5083$.

La ecuación del costo modular también tiene en cuenta el factor de material F_M , que para este caso se toma como uno, valor dado para equipos elaborados a partir de acero al carbono.

Se debe calcular el costo del equipo comprado C_p^0 , con la siguiente ecuación:

$$\log_{10} C_p^0 = K_1 + K_2 * \log_{10}(A) + (K_3 * \log_{10}(A))^2 \quad (36)$$

Para tanques de proceso verticales, los valores de K_1 , K_2 y K_3 son 3.4974, 0.4485, y 0.1074 respectivamente. La letra A corresponde al atributo principal del equipo en metros cúbicos (m^3), que en este caso es el volumen del cilindro $A= 0.0033 m^3$. Con estos valores, se obtiene un $C_p^0= \$1111.39 USD$.

Finalmente, se aplica la ecuación de costo modular, tomando como B_1 Y B_2 las constantes en la bibliografía para un tanque de proceso[38], con valores de 2.25 y 1.82.

$$C_{BM} = C_P^0 * (B_1 + B_2 * F_M * F_P) \quad (37)$$

4.5.1.2 Costo de platos perforados

Para calcular el valor del costo de las bandejas se realiza un procedimiento semejante al anterior, variando el cálculo del factor de presión, por la búsqueda del valor F_q , que se establece según la ecuación 38.

$$\log_{10} F_q = C_1 + C_2 * \log_{10}(P) + (C_3 * \log_{10}(P))^2 \quad (38)$$

Al usar los valores de las constantes C_1 , C_2 Y C_3 dados para platos perforados, de 2.9949, 0.4465 y 0.3961 respectivamente, se obtiene un valor de 0.3669.

A continuación se calcula el C_p^0 , obteniendo un resultado de \$48 835 USD.

Para estimar el costo del módulo para platos perforados, se usa la ecuación 39.

$$C_{BM} = C_P^0 * N * F_{BM} * F_q \quad (39)$$

4.5.1.3 Costo total del módulo principal

El costo total del módulo se obtiene sumando los valores del CBM para la columna y los platos perforados, dando como resultado un valor de \$571.88 USD.

Las constantes de todos los cálculos anteriores están dadas para el 2001. Se usa el CEPCI (Índice de Costo para Plantas Químicas) para actualizar este valor al año 2016, mediante la ecuación 40.

$$C_2 = C_1 * \frac{I_2}{I_1} \quad (40)$$

Usando el CEPCI de 2001 como 384, y 533.9 para 2016, se obtiene un Costo Modular actualizado a 2016 de \$795.128 USD, equivalente a \$ 2 319 181.84 COP.

4.5.1.4 Costos estimados de adquisición de una columna comercial

Tabla 29. Costos comerciales de los componentes del equipo.

Concepto	Cantidad	Valor unitario	Valor total
COLUMNA PRINCIPAL Y PLATOS			
Módulo principal	1		2 319 181.84
ESTRUCTURA DE SOPORTE DE LA COLUMNA			
Estructura piramidal en acero	1		130 000
Placas de soporte para la columna	2		60 000
SISTEMAS COMPLEMENTARIOS			
Accesorios para muestreo	9	9 300	83 700
Accesorios en PVC (válvulas, boquillas y divisores)	14		59 100
Manguera Industrial (PTFE)	6 metros	16 750	100 500
Recipientes de Alimentación y solvente	2	5 000	10 000
Recipientes de extracto y refinado	2	4 300	8 600
Empaques o-ring (PTFE)	17	7 850	133 450
Bomba Peristáltica de bajo caudal	2	2 338 400	4 676 800
COMPONENTES NECESARIOS PARA ENSAMBLAJE			
Tuercas, Tornillos	70	10 000	10 000
Amarres	10	250	2 500
Teflón	6	2 000	12 000
Soldadura para PVC	1	4 000	4 000

Fuente: Autor

En la tabla 29 se muestran los valores comerciales de las piezas requeridas para el montaje de un equipo de extracción líquido-líquido a escala laboratorio, además del módulo principal (columna y platos perforados) y bombas peristálticas como sistema de impulsión de las corrientes de entrada del proceso. El resumen de los costos de adquisición y la inversión total requerida se observan en la tabla 30.

Tabla 30. Costo comercial totalizado.

Concepto	Valor
Columna principal y platos	2 319 181.84
Estructura de soporte de la columna	190 000
Sistemas complementarios	5 072 150
Componentes necesarios para ensamblaje	28 500
TOTAL	7 609 831.84

Fuente: Autor

1.5.2 Inversión Económica en el prototipo de Extracción Líquido-Líquido

A continuación (Tabla 31) se muestra la relación de los diferentes costos incurridos para la construcción de un prototipo a escala laboratorio de una columna de extracción líquido-líquido.

Tabla 31. Materia Prima e insumos.

Concepto	Cantidad	Valor unitario	Valor total
COLUMNA PRINCIPAL Y PLATOS			
Módulo común (polipropileno)	6	145 000	870 000
Módulo de Entrada (polipropileno)	2	150 000	300 000
Tapa (polipropileno)	2	50 000	100 000
Lámina para mecanizado de platos (polipropileno) 8 mm x 500 mm x 500 mm	1	75 000	75 000
Lámina para mecanizado de bajantes (polipropileno) 3 mm x 400 mm x 400 mm	1	34 800	34 800
Mecanizado de la ranura para empaques de sello	8		25 000
ESTRUCTURA DE SOPORTE DE LA COLUMNA			
Estructura piramidal en acero	1		130 000
Placas de soporte para la columna	2		60 000
Estructura para los tanques almacenamiento	1		60 000
Pintura en aerosol	4	8 000	24 000
SISTEMAS COMPLEMENTARIOS			
Acoples rápidos para muestreo	9	9 300	83 700
Accesorios en PVC (válvulas, boquillas y divisores)	14		59 100
Manguera Comercial			6 000
Recipientes de Alimentación y solvente	2	5 000	10 000
Recipientes de extracto y refinado	2	4 300	8 600
Empaques o-ring	17	3 400	57 800
Bomba de Solvente	1	87 300	87 300
Bomba de Alimentación	1	100 000	100 000
COMPONENTES NECESARIOS PARA ENSAMBLAJE			
Tuercas, Tornillos	70	10 000	10 000
Amarres	10	250	2 500
Teflón	6	2 000	12 000
Silicona Transparente Adhesiva	1	8 000	8 000
Soldadura para PVC	1	4 000	4 000

Fuente: Autor

Los costos incurridos para la fabricación del módulo de extracción se mencionan en la tabla 32.

Tabla 32. Resumen de costos de Producción.

Concepto	Valor
Columna principal y platos	1 404 800
Estructura de soporte de la columna	274 000
Sistemas complementarios	412 500
Componentes necesarios para ensamblaje	36 500
TOTAL	2 127 800

Fuente: Autor

Como costos indirectos de fabricación, se tiene: el envío de uno de los accesorios de muestreo requerido para mecanizar la rosca interna de cada orificio en los módulos de la torre, así como los costos de transporte para la prueba y posterior instalación del equipo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de Pamplona.

Tabla 33. Costos indirectos de fabricación.

Concepto	Valor total
Envío de pieza para mecanizado de rosca interna	30 000
Transporte del equipo a la universidad	36 000
TOTAL	66 000

Fuente: Autor

Teniendo en cuenta los costos directos e indirectos de fabricación de la columna (Tabla 33), el valor total invertido en la construcción y puesta en marcha del equipo de extracción líquido-líquido a escala laboratorio fue un total de \$2 193 800 COP.

5. DIAGNÓSTICO Y ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO

El prototipo de extracción líquido-líquido escala laboratorio, será ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias del programa de Ingeniería Química de la Universidad de Pamplona. En este capítulo se argumenta la selección del disolvente orgánico usado; también se muestra el manual para la operación y mantenimiento del equipo, así como una guía de laboratorio con la descripción suficiente para implementar su utilización en el entorno académico. Además, se muestran los resultados obtenidos de su puesta en marcha con un sistema ternario específico, y los cálculos pertinentes con el fin de comprobar el funcionamiento de la columna construida.

5.1 MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

A continuación se presenta el documento elaborado con las especificaciones de la operación y mantenimiento del prototipo de extracción líquido-líquido.

MANUAL DE OPERACIÓN DE LA COLUMNA DE EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO DE PLATOS PERFORADOS

TABLA DE CONTENIDO

1. *Introducción*
2. *Definiciones*
3. *Aplicación*
4. *Descripción del equipo*
5. *Requerimientos*
6. *Operación del equipo*
7. *Mantenimiento*
8. *Recomendaciones y cuidado para el manejo del equipo*

INTRODUCCIÓN

La operación de separación denominada como extracción líquida, consiste en el contacto directo de dos fases líquidas inmiscibles entre las cuales se transporta y distribuye un soluto provocando la separación del mismo con respecto a la mezcla líquida original. Se deben tener en cuenta algunos aspectos técnico-operativos para definir los parámetros de la operación, la composición de la alimentación, la elección del disolvente, el grado de separación deseado y la velocidad de flujo. [2]

Antes de colocar el equipo de extracción líquido-líquido en funcionamiento se recomienda una rigurosa interpretación del manual de operación de este equipo con el fin de evitar daños en el equipo y daños al operador

Este manual muestra el proceso de aplicación preciso para la columna de extracción líquido-líquido de platos perforados, presentando de manera detallada la forma de uso de los componentes presentes en esta, con el fin de prevenir posibles daños a los operadores o al equipo en función

DEFINICIONES

A continuación se muestran algunas definiciones acerca de los tipos de mantenimiento que existen y de la operación que se va a realizar.

Mantenimiento: Conjunto de acciones que se realizan con la finalidad de prevenir o corregir daños que se produzcan en los equipos o instalaciones durante su funcionamiento.

Mantenimiento rutinario: Es una serie de acciones que se realizan para la conservación de las instalaciones y equipos para evitar fallas en su funcionamiento.

Mantenimiento correctivo: Acciones que se realizan para reparar daños que se producen por efectos del deterioro o mal funcionamiento de un sistema y que no ha sido posible evitar con el mantenimiento preventivo.

Mantenimiento preventivo: Es una serie de acciones que se realizan para la conservación de las instalaciones y equipos para evitar fallas en su funcionamiento.

Operación: Conjunto de acciones adecuadas y oportunas que se efectúan para que todas las partes del sistema funcionen en forma continua según las especificaciones de diseño.

Operador: Persona calificada y responsable de la operación y el mantenimiento de las instalaciones del sistema.

APLICACIONES

La aplicación de esta guía de operación será de utilidad para el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad de Pamplona, con el fin de que se conozcan las generalidades, recomendaciones y cuidados que se deben tener en cuenta para poner en marcha el equipo de extracción líquido-líquido, además de observar el fenómeno de extracción para adquirir el conocimiento sobre este.

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

La columna de extracción líquido-líquido se puede observar en la Figura 41; el equipo cuenta con las siguientes partes:

1. Una columna de Polipropileno de 1677,5 mm que consta de:
 - 1.1. 8 módulos de 200 mm de altura, 50 mm de diámetro y 5mm de espesor; 6 de estos cuentan con entradas para los accesorios en el medio de cada módulo y los dos restantes con entradas cerca a uno de sus extremos, para el ingreso de las líneas de alimentación y disolvente de extracción.
 - 1.2. 2 bridas en cada módulo con 4 agujeros para unir estos con tornillos, y una perforación circular de 63,9 mm de diámetro para colocar empaques tipo O'ring que permitan sellar la unión entre módulos.
2. 5 platos de 50 mm de diámetro y 8 mm de espesor de polipropileno con las siguientes características:
 - 2.1. Diámetro de orificio de 3 mm
 - 2.2. 27 agujeros con un espaciamiento triangular equilátero de 2,58 mm
 - 2.3. Altura de acuerdo al bajante de 6,024 mm
 - 2.4. Distancia desde el área de dispersión al extremo contrario del plato de 16,978 mm
3. 2 Falsos platos en las entradas de la torre con 50 mm de diámetro y 8 mm de espesor de polipropileno con las siguientes especificaciones:
 - 3.1. Sección de 42,71 mm donde está el falso plato
 - 3.2. Orificio de 2,64 mm
4. 7 láminas bajantes de polipropileno que van sujetos a cada plato con las siguientes características:
 - 4.1. Todos cuentan con 3 mm de espesor
 - 4.2. 4 cuentan Altura de 184,02 mm y 32,5 mm de ancho
 - 4.3. El bajante del falso plato inferior es de 189 mm de altura y 38,42 mm de ancho
 - 4.4. El bajante del falso plato superior es de 184,02 mm de altura y 38,42 mm de ancho
 - 4.5. El bajante del ultimo plato es de 276,03 mm de altura y 32,5 mm de ancho
5. 4 tanques de alimentación, solvente, almacenamiento del extracto y refinado de polipropileno con capacidad de 4 litros cada uno.
6. 9 acoples rápidos de aire a espiga manguera de bronce que van puestos en cada uno de los orificios de los módulos

7. 4 mangueras de politetrafluoroetileno que van conectadas a las entradas de alimentación y disolvente de extracción de la torre y a las salidas de extracto y refinado de la torre.
8. 2 bombas para las entradas de alimentación y disolvente de extracción de la torre.
9. Una estructura piramidal con una base de 575,18 mm² con las siguientes especificaciones:
 - 9.1. Una placa de 530 mm² con una arandela centrada de 95 mm y 20 mm de altura para sostener la torre y una abertura de 30 mm en el centro de la misma, para ubicar la salida del extracto.
 - 9.2. Una placa de 200 mm² separada en dos secciones del mismo tamaño con un orificio central de 60 mm para ajustar la cima de la torre.
 - 9.3. 2 marcos de refuerzo distribuidos de forma equidistante a las placas superior e inferior de la columna, que sostienen una arandela de 60 mm de diámetro cada uno, para sostener la columna a los lados y estabilizarla verticalmente.



Figura 41. Columna de extracción líquido-líquido a escala laboratorio.

REQUERIMIENTOS

Para el buen funcionamiento del equipo es necesario tener en cuenta algunos requerimientos previos antes del inicio de la operación como lo son:

- Suministro eléctrico: 110V/ 50-60 Hz.
- Suministro de agua.
- Cronómetro.
- Refractómetro o densímetro.
- Reactivos.

OPERACIÓN DEL EQUIPO

La operación de la columna de extracción líquido-líquido es muy sencilla, básicamente es llevar una vigilancia de la eficiencia de la torre para proceder a la extracción de las soluciones. Esta vigilancia está relacionada con el control del caudal de las entradas de alimentación y disolvente de extracción que ingresa a la torre. A continuación se muestra la información para poner en funcionamiento la columna.

Instrucciones para el inicio de la operación

1. Realizar una inspección de los tanques de alimentación, disolvente de extracción, extracto y refinado, en caso de que tengan alguna grieta o fuga por la cual se puedan salir las soluciones
2. Cargar el tanque de alimentación y del disolvente de extracción verificando que el nivel de las soluciones estén por encima de las bombas.
3. Verificar la conexión eléctrica de las bombas y encenderlas.
4. Empezar el proceso de extracción líquido-líquido en la columna.
5. Una vez llena la torre se apagan las bombas de alimentación y disolvente de extracción.
6. Después de 15 minutos extraer las soluciones en los tanques de extracto y refinado de la torre.
7. Lavar la torre con agua destilada

Apagado de emergencia

Si en algún caso se llega a presentar una situación de emergencia se recomienda apagar las dos bombas de entrada, de esta manera se detendrá la operación.

MANTENIMIENTO

Mantenimiento rutinario de la torre

El propósito del mantenimiento Rutinario, es el de mantener los equipos mediante la ejecución diaria de limpieza, lubricación, cambios, ajustes e inspección. Todas las veces que se use la torre se recomienda la supervisión del docente encargado del tema y con la compañía de al menos tres estudiantes y es necesario también seguir las instrucciones de operación que se mencionaron anteriormente para

prevenir cualquier accidente. El mantenimiento rutinario incluye actividades periódicas que consisten en el drenaje y evacuación de los compuestos que quedan acumulados en la unidad por medio de una limpieza con agua destilada. También se recomienda una vez terminada la operación soltar todos los accesorios de la torre, lavarlos con agua destilada y secarlos muy bien para que estos no se oxiden.

Mantenimiento correctivo de la torre

El mantenimiento correctivo trata acerca de corregir las averías a medida que se van produciendo, con el fin de realizar una reparación inmediata. A continuación se muestran una serie de pasos de prevención en caso de que ocurra algún accidente:

1. En caso de que se presenten fugas en alguno de los módulos de la torre es necesario desarmar el modulo que presente el problema, cambiar el teflón en este módulo y volver a armar la torre.
2. En caso de que se presenten fugas en los acoples hembra rápidos aire espiga manguera, es necesario soltarlos de la torre, cambiar el teflón y volverlo a colocar.
3. En caso de que alguna manguera tenga una fuga, se deberá hacer en primera instancia el cambio de esta por una nueva.
4. En el caso de que la torre presente alguna inclinación es necesario retirara de la estructura y proporcionar en la base de la misma una espuma de polietileno de 5mm con el fin de nivelar la estructura.
5. En caso de que los tanques de alimentación, disolvente de extracción, extracto y refinado presenten alguna falla o grieta es necesario reemplazarlos por unos nuevos, estos se pueden conseguir en el mercado a un buen precio.
6. En el caso de que las soluciones presenten contaminación debido al desgaste de los empaques es necesario desarmar la torre y cambiar los empaques por unos nuevos, estos se pueden conseguir en el mercado a un precio rentable.
7. En el caso de que la estructura presente problemas de óxido es necesario cambiarle la pintura por pintura anticorrosiva.
8. En el caso de que los acoples hembra rápidos aire espiga manguera presenten oxidación es necesario reemplazarlos por unos acoples nuevos.

Recomendaciones y cuidados en el equipo

Como prioridad se debe tener en cuenta la seguridad del operante al manejar el equipo de extracción, por este motivo se mencionan a continuación una serie de recomendaciones de seguridad:

1. Es necesario el uso de implementos de seguridad como gafas de seguridad, bata de laboratorio y guantes de nitrilo
2. El laboratorio debe contar con el equipo necesario contra incendios y un botiquín médico, además es necesario observar las salidas de emergencia

3. El área de trabajo debe estar ventilada mientras se encuentre el equipo en operación.
4. Mantener el piso libre de derrames líquidos y de objetos o materiales que puedan causar algún accidente.
5. No trabajar el equipo solo, antes de operar el mismo debe revisar que todas las partes estén en orden.
6. Es importante investigar acerca de las fichas de seguridad de los compuestos que va a usar en la operación
7. Es necesaria la limpieza del equipo después de cada práctica para garantizar la óptima duración de este.
8. Todos los reactivos deben ser manejados con cuidado. Se debe evitar el contacto con la piel, ojos, ingestión e inhalación.
9. Tener en cuenta las líneas de residuos para las diferentes soluciones en caso de que no se pueda recuperar el solvente.

5.2 PRÁCTICA DE LABORATORIO DE EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO

A continuación se muestra la guía elaborada para realizar la práctica de extracción líquido-líquido usando el prototipo construido.

PRÁCTICA DE LABORATORIO

EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO A ESCALA LABORATORIO DE COMPUESTOS ORGÁNICOS.

1. OBJETIVOS

1. Aprender sobre la técnica de extracción líquido-líquido apreciando su importancia para la separación de componentes de una mezcla homogénea de compuestos orgánicos.
2. Identificar cada una de las partes de la columna de extracción líquido-líquido de platos perforados.
3. Determinar las condiciones para el buen funcionamiento del sistema de extracción.

2. INTRODUCCION

Es una afirmación que casi todos los productos que el ser humano emplea en la actualidad han sido obtenidos mediante métodos químicos y físicos. En los métodos químicos, se parte por lo general de moléculas sencillas con el objetivo de obtener moléculas mucho más grandes y complejas. Los métodos físicos, en cambio no necesariamente siguen dicho patrón. Antes bien, lo que se busca con estos es aislar moléculas de tamaño más o menos considerable a partir de sus fuentes naturales. Uno de estos métodos es el método de la extracción líquido-líquido.

La prioridad durante la práctica de laboratorio es conocer al fondo el fenómeno de extracción, los factores que influye en la misma, las aplicaciones más comunes de extracción y la forma de realizar los cálculos de extracción de forma teórica (Diagrama ternario) y experimental.

3. FUNDAMENTO TEORICO

La operación de separación denominada como extracción líquida, llamada algunas veces extracción con disolventes, consiste en el contacto directo de dos fases líquidas inmiscibles entre las cuales se transporta y distribuye un soluto provocando la separación del mismo con respecto a la mezcla líquida original [2]. En todas las operaciones de este tipo, la solución que se va a extraer se llama *alimentación* y *disolvente* el líquido con el cual se pone en contacto la alimentación. El producto de la operación rico en disolvente se llama *extracto*; el líquido residual de donde se separó el soluto es el *refinado*[5].

Para que el proceso de extracción sea exitoso se necesita elegir el disolvente adecuado para una mejor separación, existen varios parámetros que sirven como guía para la selección del disolvente. Entre las influencias de las propiedades fisicoquímicas más importantes sobre la extracción con disolvente está la selectividad. La capacidad de disolución, la insolubilidad del disolvente, la recuperabilidad de este mismo, la densidad en las fases, la tensión interfacial, la reactividad química, la corrosión que el disolvente pueda ocasionar, la viscosidad y entre otras.

La extracción líquido-líquido se aplica industrialmente en gran variedad de procesos industriales como la obtención metales, la industria alimentaria y la desulfuración de productos petrolíferos. Es utilizada en la fabricación de productos farmacéuticos como la penicilina, separación de compuestos no saturados en aceites vegetales; extracción de fenol en aceites ligeros[4]. También se aplica para separaciones de metales como vanadio-uranio, hafnio-zirconio, tungsteno-molibdeno, o purificación de productos inorgánicos tales como el ácido fosfórico, ácido bórico, o hidróxido sódico; la separación de hidrocarburos aromáticos y parafínicos por extracción con disolventes como el dióxido de azufre y el dietilenglicol o sulfolano es relativamente sencilla por este método[5].

La extracción líquido se presenta generalmente como un sistema de tres líquidos, con un par parcialmente soluble, en donde uno o dos de los componentes aparecen en cierta medida en las dos fases de la mezcla. El estudio termodinámico del equilibrio líquido-líquido se representa cuantitativamente mediante los coeficientes de actividad de los componentes, que muestra la actividad química real de las sustancias distribuidas en las dos fases inmiscibles. La representación del equilibrio de

un sistema ternario isotérmico mediante una expresión matemática sencilla es casi imposible, es por esto que la mejor forma de representarlos es una gráfica empleando coordenadas triangulares[9].

Las operaciones de extracción líquido-líquido se llevan a cabo generalmente en columnas. Debido a que los componentes se encuentran en una misma fase, se requiere de elementos auxiliares (agitadores, dispersores, mezcladores) que favorezcan el contacto entre los componentes del sistema, de manera tal que se alcance una mayor dispersión; si se consigue ampliar la magnitud de la superficie de contacto, se favorece el fenómeno de transferencia de masa interfacial del soluto a través de los dos líquidos inmiscibles, generando mayor eficiencia de operación.

4. MATERIALES Y REACTIVOS

Materiales:

- Equipo de extracción Líquido-Líquido de platos perforados
- Refractómetro
- 3 probetas
- 10 vasos precipitados de 50 mL
- 3 pipetas de 5 mL
- 3 pipeteadores

Reactivos:

- Agua Destilada
- Etanol
- Alcohol bencílico

5. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

El proceso de extracción consiste en la separación de etanol en una mezcla agua etanol, por medio del alcohol bencílico como disolvente de extracción, la mezcla de alimentación es transportada por medio de una bomba a la parte inferior de la columna siendo esta la fase dispersa durante el proceso, de igual forma el disolvente de extracción es transportado por una bomba a la parte superior de la torre como la fase continua de la operación; como resultado de la operación por la parte inferior sale el extracto con el soluto que en este caso es el alcohol bencílico con la mayor parte de etanol y por la parte superior sale el refinado con el agua y la parte de etanol que no alcanzó a ser extraída. En la Figura 42 se observa el diagrama de flujo del proceso.

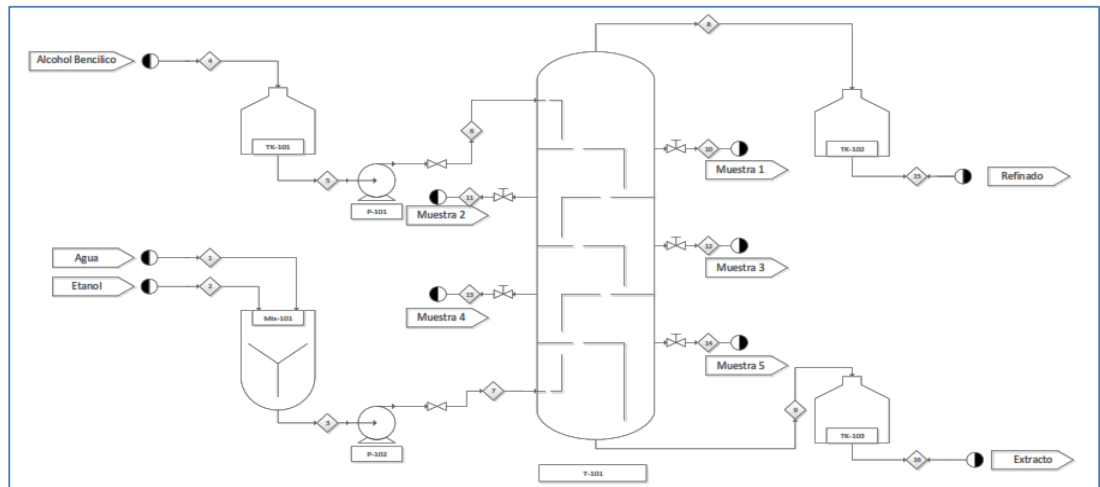


Figura 42. Diagrama de flujo de la extracción líquido-líquido.

6. PROCEDIMIENTO DE LA PRACTICA

Para el desarrollo de la práctica se deben poner en marcha los siguientes pasos:

1. Preparar la solución de la alimentación con un valor de 3L que contenga un 30% en volumen de etanol y un 70% en volumen de agua destilada y agregarla al tanque de alimentación de la torre.
2. Agregar 3L alcohol bencílico puro en el tanque del solvente de extracción.
3. Encender las bombas de las entradas de alimentación y del solvente de extracción.
4. Iniciar la marcha del equipo de extracción observando el fenómeno de extracción y verificando cuando esta se llene.
5. Una vez llena la torre es necesario tomar muestras por cada una de las etapas cada 5 minutos 3 veces y guardarlas previamente
6. Pasados los 15 minutos retirar las mezclas por las salidas de extracto y refinado
7. Medir el volumen final de los tanques de extracto y refinado
8. Con un refractómetro tomar el valor de cada etapa durante los tiempos establecidos y de igual forma el valor del extracto y refinado de la torre.
9. Teniendo estos valores se calcula las composiciones en cada etapa y las composiciones en el extracto y refinado.

5.3 SELECCIÓN DEL SISTEMA TERNARIO IMPLEMENTADO

5.3.1 Elección del solvente

Antes de iniciar las pruebas es de suma relevancia la selección de disolvente de extracción; para evaluar los solventes propuestos se deben tener en cuenta ciertos factores y dependiendo de esto se podrá escoger la mejor alternativa. Los factores primordiales para la selección del solvente se encuentran en la tabla 2 en el capítulo del marco teórico; para este caso de estudio se van a tomar los más importantes como lo son la toxicidad, la inflamabilidad, la reactividad química, la corrosión que pueda ocasionar, la manipulación segura, la disponibilidad, el costo comercial, la facilidad de análisis y la recuperabilidad. Teniendo esto en cuenta, se estudió la influencia de cada uno de estos criterios en la manipulación segura del solvente.

Como sabemos la toxicidad es la capacidad que tienen los compuestos químicos de producir algún daño o efecto secundario en el ser humano[39], por lo cual se recomienda que el solvente de extracción a escoger tenga una baja toxicidad a la inhalación, contacto con la piel y los ojos siempre que sea posible, de manera que aumente la seguridad durante la exposición del operador en el mantenimiento o reparación de la columna.

El punto de inflamabilidad se conoce como el conjunto de condiciones del entorno para que una sustancia combustible inflamable inicie una combustión debido a una fuente de calor[40]. En el caso de la columna de extracción se recomienda no trabajar con sustancias que puedan reaccionar al calor a partir de los 35°C, con el fin de evitar posibles accidentes durante la operación.

Es bien sabido que una sustancia química es reactiva cuando esta es capaz de reaccionar con otra sustancia química, en este caso el disolvente de extracción debe ser estable e inerte químicamente frente a los demás componentes del sistema y los materiales de construcción.

Se define como corrosión el deterioro de un material por causa de un ataque electroquímico[41]. Es decir, cualquier material que entre en contacto con un solvente corrosivo se disolverá hasta que se consuma totalmente, por esto una recomendación importante es que el solvente a escoger no sea corrosivo, para evitar deterioros en el material de la columna ante este tipo de compuestos.

Para el manejo seguro de sustancias químicas se debe tener en cuenta algunas precauciones respecto al transporte, almacenamiento y manipulación de la misma, por ello es necesario conocer el manejo seguro de cada disolvente para cumplir con

cada uno de los requisitos nombrados anteriormente, cuidando que la persona que manipule estos compuestos no sufra algún accidente[42].

Otro parámetro importante es la consulta previa acerca de la disponibilidad de este en el mercado para su adquisición, junto a esto también se encuentra el costo comercial que esta conlleva, por eso es necesario hacer una previa cotización de los solventes disponibles en el mercado buscando un costo rentable para su adquisición.

Respecto a la recuperabilidad, el disolvente de extracción debe ser recuperado de la corriente de extracto y la de refinado tras el proceso de extracción. A menudo se utiliza la destilación, por lo que es importante tener en cuenta que la volatilidad relativa de éste sea significativamente menor o mayor a la unidad respecto al componente a extraer.

Luego de tener claros todos los factores para seleccionar el solvente, se escogieron 6 diferentes solventes que puedan remover el etanol presente en una mezcla etanol-agua. Estos solventes son el acetato de amilo, el alcohol bencílico, la metil-isobutil-cetona, el dibutil éter, el dietil éter y el diclorometano, se realizó un estudio de seguridad en el proceso de extracción para estos disolventes teniendo en cuenta los factores mencionados anteriormente; en la tabla 1 se muestran los valores de acuerdo a una valoración cualitativa de sus características.

Para valorar el solvente de aplicación más viable, se realiza una valoración cuantitativa de criterios cualitativos, siendo necesario definir una escala de valoración para esto, la cual está compuesta por las siguientes afirmaciones:

10- Extremadamente peligroso, riesgo de accidentes graves.

6- Altamente peligroso, accidente importante

4- Moderadamente peligroso

1- No presenta peligro, probabilidad de accidentes es cercana a cero

Tabla 34. Riesgos químicos del solvente de extracción.

Solvente	Tóxico			Toxicidad potencial	Inflamabilidad	Reactividad violenta	Sustancia Corrosiva	Valor
	Por Inhalación	Contacto con la piel	Ingestión					
Acetato de amilo	4	1	6	4	10	4	1	4.75
Alcohol Bencílico	6	4	6	6	1	1	1	2.25
Metil-isobutil-Cetona	6	6	6	6	6	1	1	3.5
Dibutil Éter	10	6	10	10	10	4	1	6.25
Dietil Éter	6	4	6	6	10	1	1	4.5
Dicloro metano	6	4	6	6	1	1	1	2.25

Fuente: Autor

Al promediar la evaluación de los criterios para cada solvente, se pueden ordenar de mayor a menor según su peligrosidad; se observa que el alcohol bencílico y el Diclorometano tienen una probabilidad de accidente cercana a cero, mientras que el dibutil éter es considerado un solvente altamente peligroso.

De igual forma se realizó una evaluación de aspectos operativos de los solventes. Los números que se presentan en la tabla 35 corresponden a una escala de valoración la cual está compuesta por las siguientes afirmaciones:

10- Muy desfavorable

6- Desfavorable

4- Favorable

1- Muy favorable

Tabla 35. Evaluación cualitativa y cuantitativa de los solventes de extracción.

Solvente	Manipulación Segura	Disponibilidad	Costo Comercial	Facilidad de Análisis	Recuperabilidad	Valor
Acetato de amilo	1	6	6	4	1	3.6
Alcohol Bencílico	1	1	4	4	1	2.2
Metil-Isobutil-Cetona	4	10	4	4	4	5.2
Dibutil Éter	4	10	4	4	1	4.6
Dietil Éter	1	4	6	6	6	4.6
Dicloro metano	6	4	4	4	6	4.8

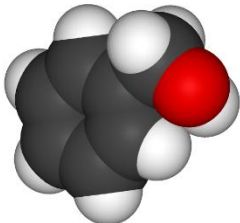
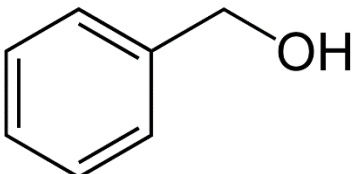


Fuente: Autor

En este caso el solvente que presenta ventajas operativas para el proceso es el alcohol bencílico, y el Dietil éter, Dibutil éter y Diclorometano presentan características desfavorables que representan dificultades de adquisición, manipulación y análisis en la operación.

Para poder asignar los valores en las tablas fue necesario buscar las fichas de seguridad de los compuestos seleccionados, estos datos fueron proporcionados por el “*instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo*” [43], y los valores para los costos comerciales de un litro de solvente en Colombia fueron proporcionados por “*Elementos químicos Ltda*” [44]. Finalmente analizando los valores obtenidos en las tablas anteriores se puede deducir que el mejor solvente de extracción de acuerdo a los factores dados y a la clasificación asignada es el Alcohol bencílico por sus buenas propiedades químicas y su excelente manipulación en el trabajo, además su costo es rentable.

A continuación se presenta en la tabla 36 la ficha técnica del alcohol bencílico con el fin de conocer su estructura y las características fisicoquímicas que presenta.

Tabla 36. Caracterización del Alcohol Bencílico.

FICHA DE SEGURIDAD DEL ALCOHOL BENCÍLICO	
Estructura química	
	
Nombre IUPAC	Fenilmetanol
Otros nombres	Fenilcarbinol
Formula estructural	
	
Formula Molecular	C ₇ H ₈ O
Numero CAS	100-51-6
Propiedades Fisicoquímicas	
Apariencia	Líquido transparente con débil olor
Densidad	1044 Kg/m ³ ; 1,044 g/cm ³
Peso molecular	108,1381 g/mol
Punto de fusión	-15°C
Punto de ebullición	205°C
Solubilidad en agua	4 g/100 mL a 20°C
Punto de inflamación	93°C
Pictograma de seguridad	
Símbolo: Xn	
Codificación NFPA	
	
Envasado y etiquetado	No transportar con alimentos.
Riesgos para la salud	
Inhalación	Los vapores pueden ocasionar irritación de garganta y nariz; pueden causar irritación de las vías respiratorias, náuseas, dolor de cabeza y vértigo.

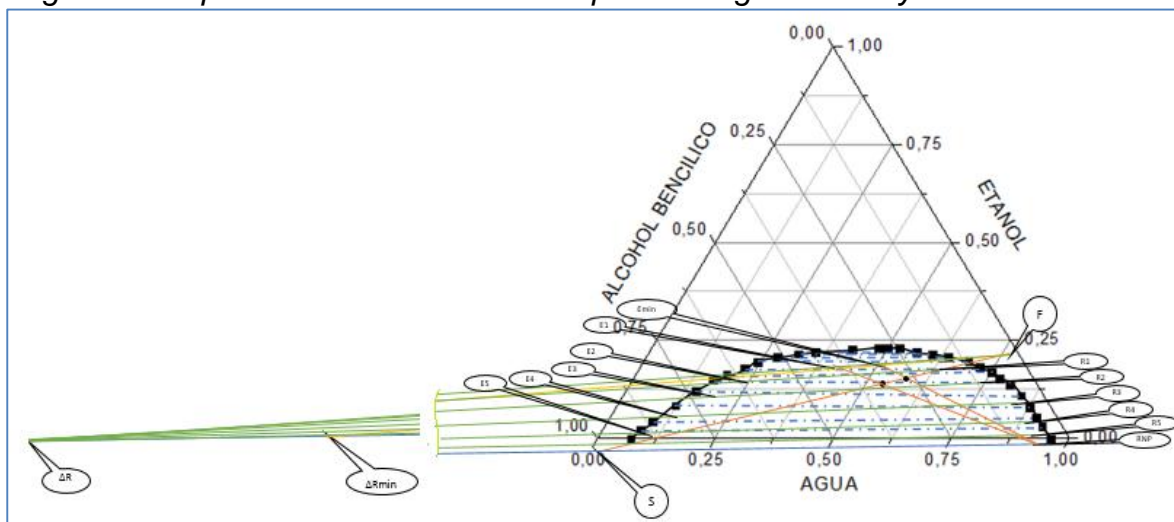
Ingestión	Puede ocasionar dolor de cabeza, náuseas, vómito y debilitamiento. Puede ocasionar irritación gastrointestinal. Las señales de depresión del sistema nervioso son la somnolencia, el vértigo, la pérdida de coordinación.
Piel	El contacto prolongado puede ocasionar dermatitis. Puede ser nocivo si es absorbido por la piel.
Ojos	El líquido y la neblina pueden irritar los ojos. Los vapores pueden irritar y causar un leve daño en la córnea.
Efectos crónicos	Dermatitis.
Almacenamiento y manipulación	
Almacenamiento	Lugares ventilados, frescos y secos. Lejos de fuentes de calor e ignición. Separado de materiales incompatibles. Rotular los recipientes adecuadamente. Los recipientes deben estar herméticamente cerrados. Almacenar a temperaturas entre 12 y 50 °C.
Manipulación	Usar siempre protección personal así sea corta la exposición o la actividad que realice con el producto. Mantener estrictas normas de higiene, no fumar, ni comer en el sitio de trabajo. Usar las menores cantidades posibles. Conocer en donde está el equipo para la atención de emergencias. Leer las instrucciones de la etiqueta antes de usar el producto. Rotular los recipientes adecuadamente y mantenerlos bien cerrados y evitar su deterioro físico. Durante el llenado o trasiego evitar derrames innecesarios.

Fuente: instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo. Página web: <http://www.insht.es/portal/site/Insht/>

5.4 CÁLCULOS TEÓRICOS DEL SISTEMA TERNARIO

Para realizar las pruebas de laboratorio con la columna de extracción líquido-líquido de uso el sistema ternario Agua (H₂O) – Etanol (C₂H₆O) – Alcohol Bencílico (C₇H₈O). El diagrama ternario se puede ver en la Figura 43.

Figura 43. Equilibrio Ternario de los compuestos Agua-Etanol y Alcohol bencílico.



Fuente: Autor

Los pasos a seguir para el cálculo del número de etapas teóricas de manera gráfica se encuentran en el capítulo de metodología; siguiendo estas pautas el número de etapas de la torre es de 5 etapas teóricas, el número de etapas tiene como objetivo principal evaluar el comportamiento del equipo de extracción para que se logre una transferencia de masa deseada. Una observación que se puede realizar en la figura anterior es que las concentraciones de extracto y refinado es que son bajas.

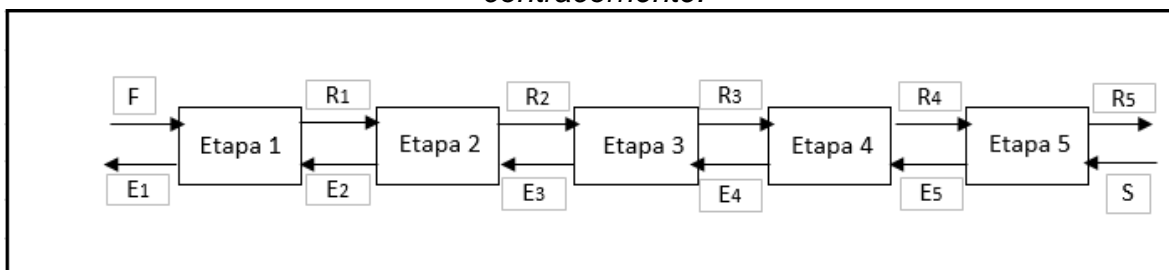
Teniendo en cuenta el valor del número de etapas de la torre se procedió a realizar la parte experimental empezando por la alimentación a la torre en forma de dos corrientes una de alimentación que consiste en 30% en volumen de etanol y 70% en volumen de agua que entra por la parte inferior de la torre como la fase dispersa y la otra compuesta por el disolvente de extracción puro que en nuestro caso es el alcohol bencílico que entra por la parte superior de la torre como la fase continua, estas corrientes circulan en la torre a contracorriente y de manera continua; los caudales máxicos de las entradas en la torre son de 28,8857L/h para la fase dispersa y 13,2857 L/h para la fase continua, la fase dispersa entra más rápido a la columna debido a que la interfase de extracción se presenta en la cima de la torre por lo que es necesario que la torre se llene más rápido desde la parte inferior; estas corrientes entran en la columna a 21°C y 583 mmHg de presión.

La forma de operación en la columna es la siguiente: el líquido ligero entra en la columna y fluye por los agujeros en cada plato siendo en este caso la alimentación de etanol y agua, de esta forma se dispersa en pequeñas gotas que se elevan por la fase continua la cual entra en la torre y fluye por medio de los tubos de descenso o bajantes y pasando por cada plato; siendo en este caso el solvente de extracción el alcohol bencílico como el líquido ligero; esta forma de extracción es una gran ventaja debido a que los platos eliminan la recirculación de la fase continua

incrementando de esta manera la velocidad de extracción por medio de la redispersión de las gotas en la fase dispersa y la coalescencia de la misma.

A partir del método gráfico usando la el equilibrio ternario también se puede conocer las fracciones másicas de todas las composiciones tanto en la fase acuosa como en la fase orgánica en las diferentes etapas de equilibrio; de igual forma se pueden hallar los flujos másicos, estos cálculos se hacen por medio de un balance de materia usando el esquema genérico representado Figura 44.

Figura 44. Esquema de la extracción líquido-líquido de varias etapas a contracorriente.



Fuente: Autor

Las ecuaciones para realizar el balance de materia teórico se muestran en las ecuaciones 1 a 4 en el capítulo de metodología. Para hallar las composiciones de extracto y refinado en cada etapa es necesario leerlas del equilibrio ternario, estos valores se recogen en la tabla 37.

Tabla 37. Composiciones de extracto y refinado en cada etapa de extracción.

ETAPA	Extracto			Refinado		
	Alcohol Bencílico	Agua	Etanol	Alcohol Bencílico	Agua	Etanol
1	0,38	0,4	0,22	0,18	0,6	0,22
2	0,6	0,23	0,17	0,1	0,72	0,18
3	0,69	0,17	0,14	0,05	0,83	0,12
4	0,78	0,13	0,09	0,04	0,88	0,8
5	0,85	0,1	0,04	0,04	0,92	0,04

Fuente: Autor

Luego de conocer los valores de extracto y refinado en cada etapa y el número de etapas teóricas en la columna, se pueden realizar los balances de materia de forma global y para cada etapa de extracción, con el balance por etapas se pueden saber las composiciones y flujos que entran y salen en cada una de las etapas teóricas. Antes de empezar con los el balance es necesario recordar que ya se conocen los flujos másicos de la alimentación (F) y del disolvente de extracción (S) debido a que

la alimentación se conoce desde el principio y el solvente se calcula con la ecuación 3 y por medio del diagrama ternario con unos valores de 1000 g/h y 473,684 g/h respectivamente.

Usando la ecuación 1 y 2, por medio de la guía en la figura 2 se halla el balance de materia global de la columna de extracción para hallar los valores de E_1 Y $R_5=R_{NP}$ dando como resultado 1061,42 g/h y 412,23 g/h respectivamente. Luego de tener los resultados del balance global se procede a calcular los flujos másicos en cada etapa; Para este cálculo se necesitan realizar los balances de materia por cada etapa usando la ecuación 1 y también por medio de la regla del brazo de palanca [2], que se halla gráficamente usando la siguiente ecuación:

$$\frac{R_{n-1}}{E_n} = \frac{\overline{E_n \Delta R}}{\overline{R_{n-1} \Delta R}} \quad (40)$$

En donde las distancias de las líneas se miden desde el diagrama ternario, además hay que tener en cuenta que el punto ΔR es igual en cada una de las etapas. A continuación se muestra la tabla 38 con los resultados de los flujos másicos en cada etapa.

Tabla 38. Flujos másicos (g/h) del extracto y refinado en cada etapa de equilibrio.

R₅	412,23	E₁	1061,42
R₁	381,45	E₂	442,87
R₂	287,03	E₃	348,46
R₃	227,24	E₄	288,67
R₄	193,15	E₅	254,58

Fuente: Autor

Un resumen de los valores obtenidos por medio de los cálculos para las entradas y las salidas en la torre se muestra en la tabla 39.

Tabla 39. Corrientes de entrada y salida de la torre.

Corriente	Densidad (g/mL)	Masa (g)	Composiciones		
			Alcohol Bencílico	Agua	Etanol
<i>Alimentación</i>	0,93426214	1000	0	0,75	0,25
<i>Disolvente</i>	1,04127	473,68	1	0	0
<i>Extracto</i>	1,0317	1061,42	0,38	0,4	0,22
<i>Refinado</i>	0,9912	412,23	0,04	0,92	0,04

Fuente: Autor

5.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para poner en marcha la operación de extracción utilizando el prototipo, se manejaron las condiciones de alimentación mostradas en la tabla 40.

Tabla 40. Corrientes de entrada de la columna.

Corriente	Densidad (g/mL)	Volumen (mL)	Masa (g)	Composición		
				Alcohol Bencílico	Agua	Etanol
Alimentación	0.985	1800	1773	0	0.75	0.25
Solvente	1.041	1350	1405.35	1	0	0

Fuente: Autor

Tabla 41. Corrientes de salida de la columna.

Corriente	Densidad (g/mL)	Volumen (mL)	Masa (g)	Composición		
				Alcohol Bencílico	Agua	Etanol
Refinado	0.9912	1400	1388	0.1030	0.80	0.096
Extracto	1.02	1850	1887	0.575	0.27	0.155

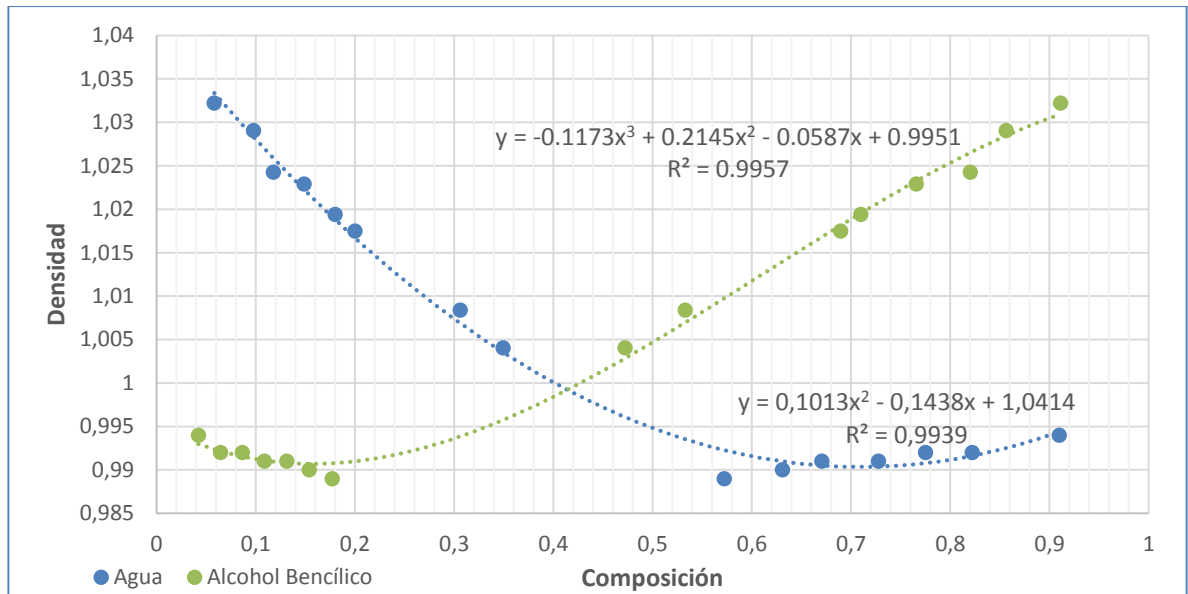
Fuente: Autor

5.5.1 Análisis densimétrico del Sistema Ternario

La columna de extracción líquido-líquido cuenta con dispositivos en cada uno de los módulos, para tomar muestras en las 5 etapas teóricas que componen el equipo. La columna se llenó completamente en un tiempo de 7 min; para garantizar la separación de las fases, se estableció un tiempo de retención mínimo de 10 min, en este caso, se dejó el sistema por un tiempo total de 15 min, tomando tres muestras a intervalos de 5 min en cada una de las etapas.

Como se mencionó en la metodología, para determinar las composiciones en cada etapa, se realizó la curva de calibración que se observa en la figura 45, según el procedimiento allí descrito. Las composiciones formuladas para cada punto y su correspondiente valor de densidad se muestran en la tabla 42.

Figura 45. Curva de Calibración.



Fuente: Autor

Tabla 42. Datos curva de calibración.

Agua	Fracción másica		Densidad (g/mL)
	Etanol	Alcohol Bencílico	
0.990	0.047	0.042	0.994
0.822	0.113	0.064	0.992
0.775	0.138	0.086	0.992
0.727	0.163	0.108	0.991
0.670	0.198	0.131	0.991
0.630	0.215	0.153	0.990
0.572	0.250	0.177	0.989
0.349	0.178	0.472	1.004
0.306	0.160	0.532	1.008
0.200	0.110	0.689	1.017
0.179	0.110	0.709	1.019
0.148	0.085	0.765	1.022
0.117	0.061	0.820	1.024
0.097	0.046	0.856	1.029
0.058	0.030	0.911	1.032

Fuente: Autor

Se registró el valor de densidad para cada etapa, calculando la fracción másica de los componentes utilizando la curva de calibración anterior. Los resultados se muestran en la tabla 43.

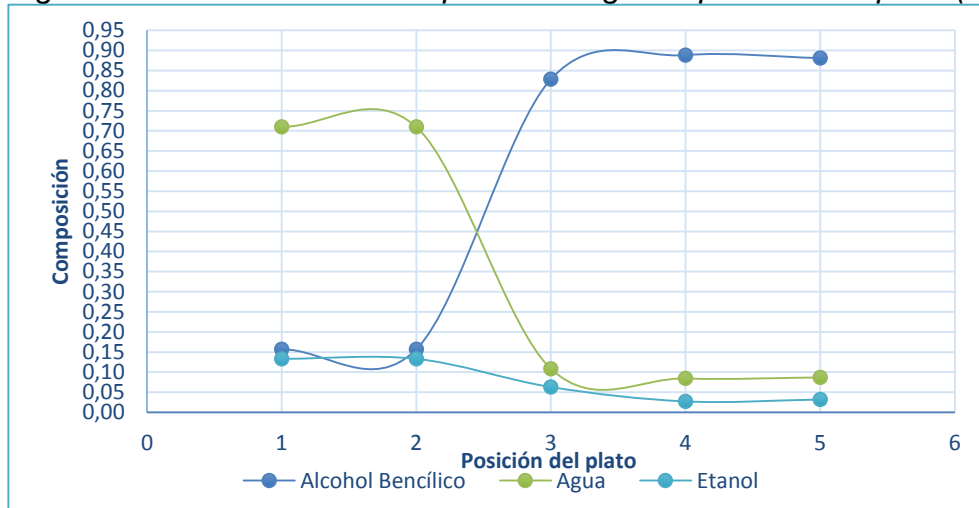
Tabla 43. Datos experimentales obtenidos del ensayo de extracción.

Etapa	Densidad (g/mL)	Fracción másica calculada		
		Alcohol Bencílico	Agua	Etanol
<i>Tiempo de retención: 5 minutos</i>				
1	0.990	0.157	0.709	0.133
2	0.989	0.157	0.709	0.133
3	1.028	0.828	0.108	0.062
4	1.030	0.888	0.084	0.027
5	1.029	0.881	0.086	0.031
<i>Tiempo de retención: 10 minutos</i>				
1	0.990	0.157	0.709	0.133
2	0.989	0.157	0.709	0.133
3	0.991	0.157	0.764	0.078
4	1.032	0.930	0.068	0.000
5	1.029	0.867	0.092	0.040
<i>Tiempo de retención: 15 minutos</i>				
1	0.991	0.199	0.630	0.169
2	0.989	0.157	0.709	0.709
3	0.989	0.157	0.709	0.133
4	1.031	0.912	0.076	0.011
5	1.028	0.847	0.100	0.054

Fuente: Autor

La figura 46 muestra el cambio de composiciones para las muestras tomadas a los 5 minutos de retención. Se observa el cambio del comportamiento de la fracción másica del agua y el alcohol bencílico entre la segunda y tercera etapa, lo que representa la zona de interfase, que distingue la fase ligera y la fase pesada producto de la extracción líquida.

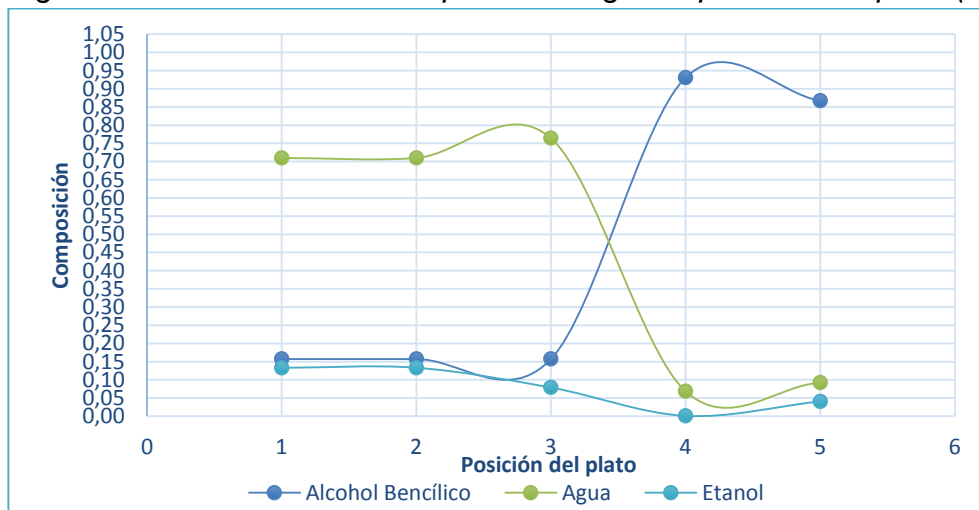
Figura 46. Variación de la composición según la posición del plato (5 minutos).



Fuente: Autor

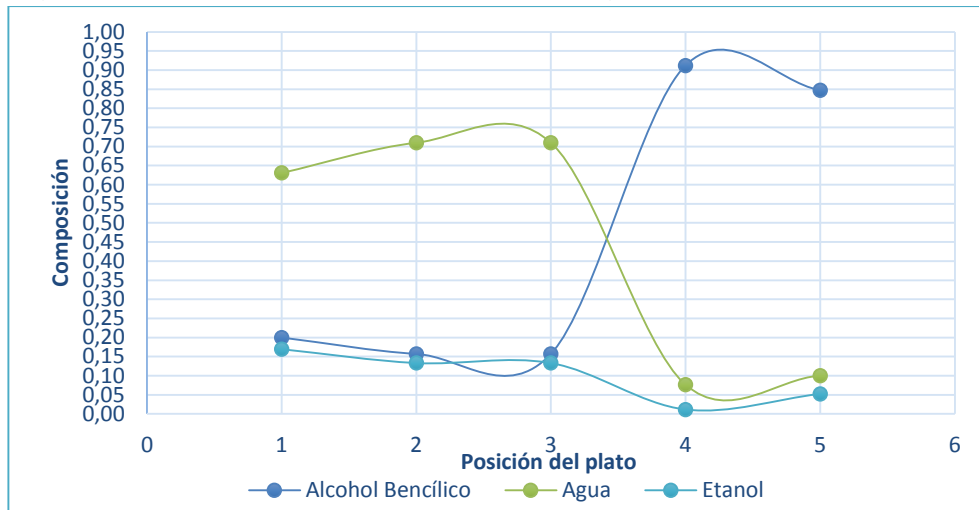
La figura 47 muestra las composiciones en cada etapa para un tiempo de retención de 10 minutos, para 15 minutos después de la operación se muestran los valores obtenidos en la figura 48. Se puede observar el desplazamiento de la interfase, que luego de 10 minutos se ubica entre la tercera y cuarta etapa de equilibrio.

Figura 47. Variación de la composición según la posición del plato (10 minutos).



Fuente: Autor

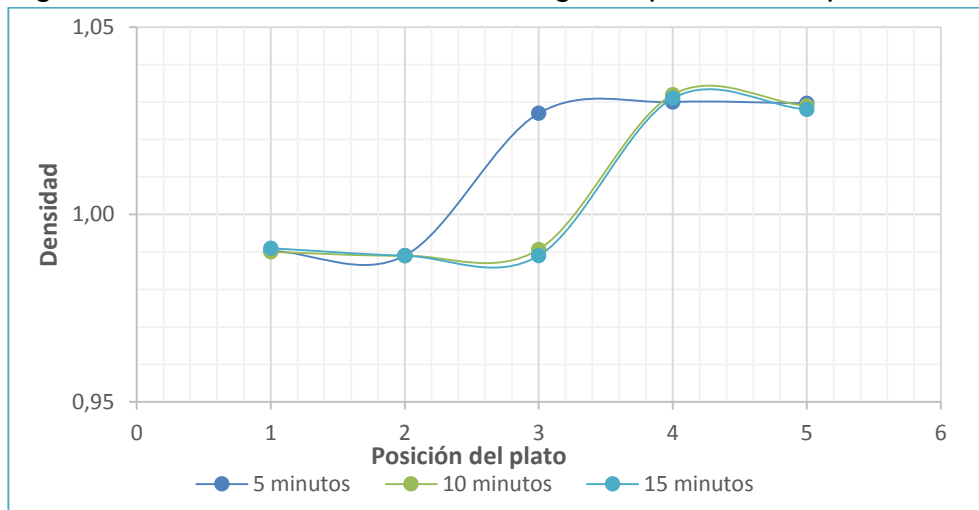
Figura 48. Variación de la composición según la posición del plato (15 minutos).



Fuente: Autor

La variación de la densidad según la posición del plato se muestra en la figura 49. De igual forma que la composición, se puede observar el cambio de densidad luego de 10 minutos de retención, cambiando la densidad de la tercera etapa, comprobando que la zona de interfase se ve desplazada hacia la siguiente etapa.

Figura 49. Variación de la densidad según la posición del plato.



Fuente: Autor

5.6 VALIDACIÓN DEL EQUIPO

5.6.1 Eficiencia teórica de la extracción

La eficiencia de la separación está dada por la ecuación 5, donde m_{AE} es la masa del soluto o componente de interés en el extracto, y m_{AF} es la masa del mismo componente en la alimentación, obteniendo el porcentaje de componente A (soluto) que fue retirado de la mezcla de alimentación. Esta ecuación también se puede escribir en términos de flujos másicos y composiciones, tal como se muestra en la ecuación 42.

$$E_f = \frac{m_{AE}}{m_{AF}} * 100 \quad (41)$$

$$E_f = \frac{(x_{AE} * E)}{(x_{AF} * F)} * 100 \quad (42)$$

Al aplicar la ecuación con los valores teóricos mostrados en la tabla 37, se tiene:

$$E_f = \frac{(0,22 * 1061,41)}{(0,25 * 1000)} * 100$$

$$E_f = \mathbf{93,40\%}$$

Dando como resultado una eficiencia en la separación de 93.40% calculada sobre los valores teóricos.

5.6.2 Eficiencia experimental de la extracción

Al aplicar la ecuación 42 utilizando los resultados de la implementación del equipo, se tiene:

$$E_f = \frac{(0,155 * 1887)}{(0,25 * 1775)} * 100$$

$$E_f = \mathbf{65,91\%}$$

Con estos cálculos resulta una eficiencia de 65.91% en la extracción de etanol calculada sobre los valores obtenidos experimentalmente.

5.6.3 Rendimiento de la columna de extracción

El rendimiento del equipo de separación se deduce a partir de la ecuación 43.

$$\%R = \frac{(x_{AE} \text{ experimental})}{(x_{AE} \text{ teórico})} * 100 \quad (43)$$

$$\%R = \frac{0,1549}{0,22} * 100$$

$$\%R = \mathbf{70.41\%}$$

Al comparar la composición del etanol en el extracto de los cálculos teóricos realizados, con la fracción másica obtenida en la corriente de salida inferior en el prototipo, resulta un rendimiento del equipo de 70,41%.

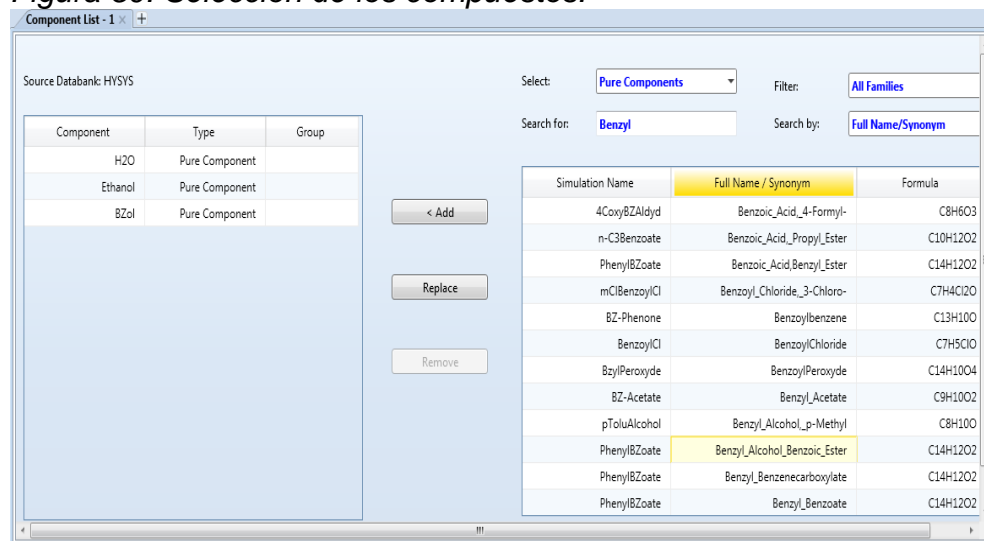
6. SIMULACION DE LA COLUMNA EXTRACTIVA

En este capítulo se hizo una simulación con Aspen Hysys versión 8,6 en donde se creó un panorama similar a la práctica experimental mencionada anteriormente con el fin de ver el comportamiento que tiene una columna de extracción líquido-líquido, a continuación se muestran los pasos que se siguieron para hacer la simulación y los resultados que se obtuvieron en ella

6.1 Pasos para la simulación:

1. En primer lugar, se crea una nueva simulación y se introducen los componentes que forman parte de las corrientes del proceso. La Figura 50 muestra la búsqueda de los componentes para que sean añadidos al paquete de componentes que se va a seleccionar para la simulación.

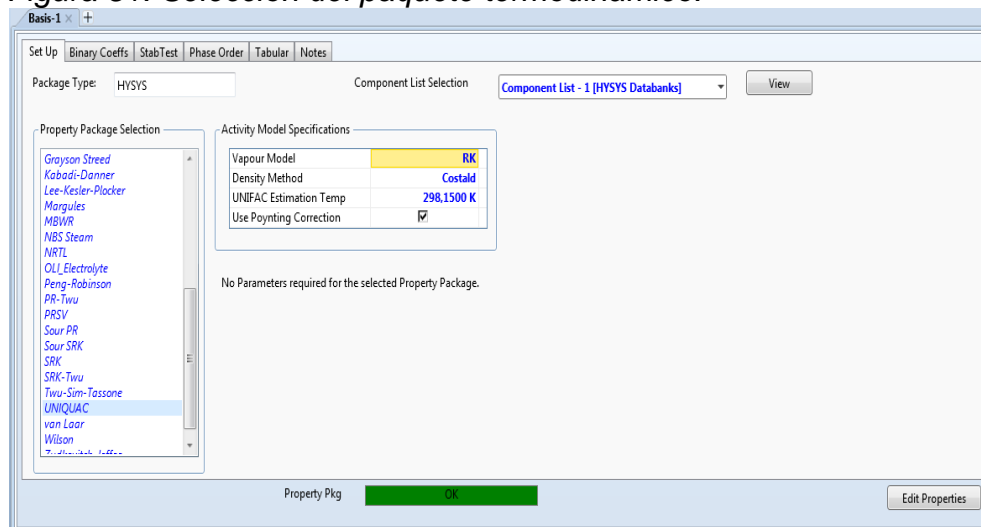
Figura 50. Selección de los compuestos.



Fuente: Aspen Hysys v8.6

2. En la siguiente figura se escoge el método termodinámico más conveniente para el tipo proceso y el tipo de componentes añadidos en la Figura. El paquete que se ha seleccionado el método común UNIQUAQ-RK, debido a que este es el que se usó para el diagrama ternario del sistema estudiado, según recomendaciones de estudios anteriores[25].

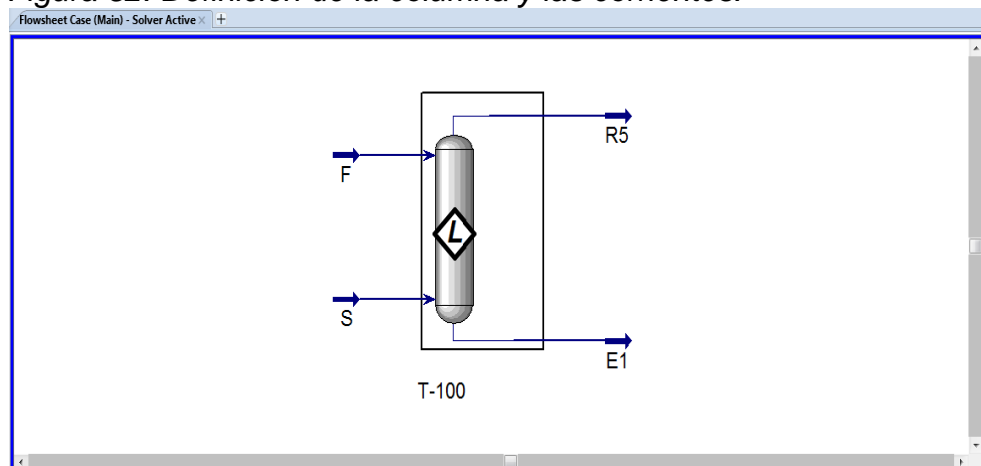
Figura 51. Selección del paquete termodinámico.



Fuente: Aspen Hysys v8.6

3. En la figura 52 se definen las corrientes que se va a operar. Se escoge el modelo de columna, que es el modelo básico utilizado para la simulación de una columna de extracción de etapas a contracorriente. No existen corrientes de entrada y salida en etapas intermedias de la columna. Una vez definidas las corrientes de entrada y salida, se les da nombre. Por la parte superior se introduce la corriente de alimentación (F) y sale la corriente de refinado (R). Por la parte inferior se introduce el disolvente de extracción (S) y sale la corriente de extracto (E).

Figura 52. Definición de la columna y las corrientes.



Fuente: Aspen Hysys v8.6

4. A continuación, se introducen los parámetros físico-químicos que definen las corrientes de entrada (F) y (S) Estos son: la temperatura, la presión, el flujo másico y la composición de los componentes anteriormente añadidos en la

Figura 1. Para la corriente de alimentación se elige una temperatura de 21°C, una presión de 583 mmHg, un caudal másico de 1,614 Kg/h y unas composiciones en fracción másica de 25% de etanol y 75% de agua; a continuación se muestran en las figuras 53 y 54 los valores mencionados anteriormente.

Figura 53. Datos de la corriente de alimentación.

Worksheet	Attachments	Dynamics
Worksheet	Stream Name	F
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0,0000
Properties	Temperature [C]	21,00
Composition	Pressure [kPa]	77,73
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	7,810e-002
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	1,660
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	1,769e-003
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole-C]	-2,845e+005
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	25,04
Cost Parameters	Heat Flow [kJ/h]	-2,222e+004
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	1,691e-003
	Fluid Package	Basis-1
	Utility Type	

Fuente: Aspen Hysys v8.6

Figura 54. Composiciones de la corriente de Alimentación.

Worksheet	Attachments	Dynamics
Worksheet		
Conditions	H2O	0,8847
Properties	Ethanol	0,1153
Composition	BZol	0,0000
Oil & Gas Feed		
Petroleum Assay		
K Value		
User Variables		
Notes		
Cost Parameters		
Normalized Yields		
	Total	1,00000

Fuente: Aspen Hysys v8.6

5. Para la corriente de disolvente de extracción se elige una temperatura de 21°C, una presión de 583 mmHg, una caudal másico de 1,660 Kg/h y puesto que es puro, se elige una composición en fracción másica de Alcohol Bencílico igual a 1, a continuación se muestran en las figuras 55 y 56 los valores mencionados anteriormente.

Figura 55. Datos de la corriente de Disolvente de extracción.

The screenshot shows the 'Material Stream: S' dialog box in Aspen Hysys. The 'Worksheet' tab is active, displaying a table of stream properties. The 'Stream Name' is 'S' and the 'Liquid Phase' is selected. The table includes properties such as Temperature, Pressure, Molar Flow, Mass Flow, and Heat Flow.

Worksheet	Stream Name	S	Liquid Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0,0000	1,0000
Properties	Temperature [C]	21,00	21,00
Composition	Pressure [kPa]	77,73	77,73
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	1,493e-002	1,493e-002
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	1,614	1,614
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	1,541e-003	1,541e-003
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-1,743e+005	-1,743e+005
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	-71,58	-71,58
Cost Parameters	Heat Flow [kJ/h]	-2601	-2601
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	1,493e-003	1,493e-003
	Fluid Package	Basis-1	
	Utility Type		

Fuente: Aspen Hysys v8.6

Figura 56. Composiciones de la corriente de Disolvente de extracción.

The screenshot shows the 'Material Stream: S' dialog box in Aspen Hysys, focusing on the composition details. The 'Worksheet' tab is active, displaying a table of mole fractions for H2O, Ethanol, and BZol. The total mole fraction is 1,00000.

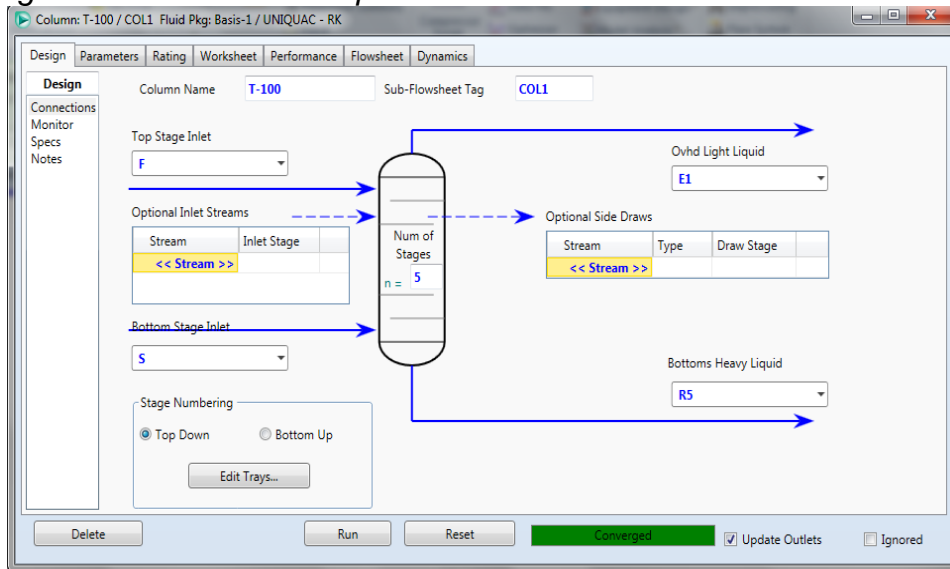
Worksheet	Mole Fractions	Liquid Phase
Composition	H2O	0,0000
	Ethanol	0,0000
	BZol	1,0000

Total: 1,00000

Fuente: Aspen Hysys v8.6

- Una vez definidas las corrientes de entrada, se especifica en la ventana observada de la Figura 57, el número de etapas teóricas de equilibrio las cuales se han calculado con anterioridad, tal que sean suficientes para que se alcancen las condiciones idóneas del proceso. Para el caso estudiado, el número de etapas teóricas calculado fue de 5 etapas.

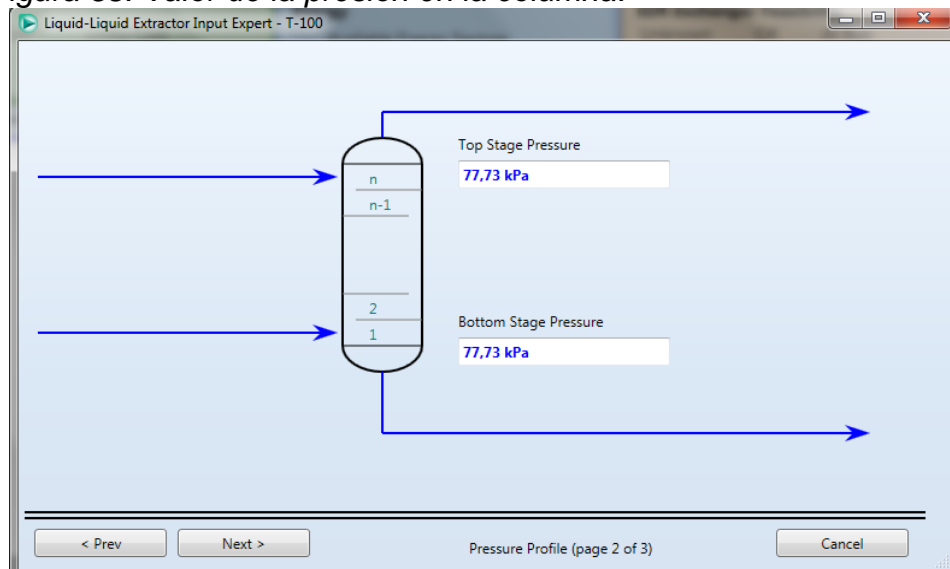
Figura 57. Numero de etapas en la columna.



Fuente: Aspen Hysys v8.6

- En la figura 58 se muestran los valores de la presión a lo largo de toda la columna. La presión será constante y tomará el valor de 583 mmHg.

Figura 58. Valor de la presión en la columna.



Fuente: Aspen Hysys v8.6

8. Finalmente, se pulsa el botón “Run” y comienza la simulación. Si el sistema converge el simulador proveerá todos los datos del sistema resuelto (Figura 59 y 60) Una vez la simulación ha terminado, aparecerá una pantalla donde se puede ver un resumen en forma de tabla, de todos los resultados obtenidos por la simulación.

Figura 59. Resultados generales.

Name	F @COL1	S @COL1	R5E @COL1	E1 @COL1
Vapour	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Temperature [C]	21,0000	21,0000	21,0489	20,8849
Pressure [kPa]	77,7270	77,7270	77,7270	77,7270
Molar Flow [kgmole/h]	0,0781	0,0149	0,0407	0,0524
Mass Flow [kg/h]	1,6597	1,6140	2,2734	1,0003
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	0,0018	0,0015	0,0023	0,0010
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-2,845e+005	-1,743e+005	-2,447e+005	-2,839e+005
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	25,04	-71,58	-10,14	28,00
Heat Flow [kJ/h]	-2,2218e+04	-2,6014e+03	-9,9492e+03	-1,4870e+04

Fuente: Aspen Hysys v8.6

Figura 60. Resultados de la composición.

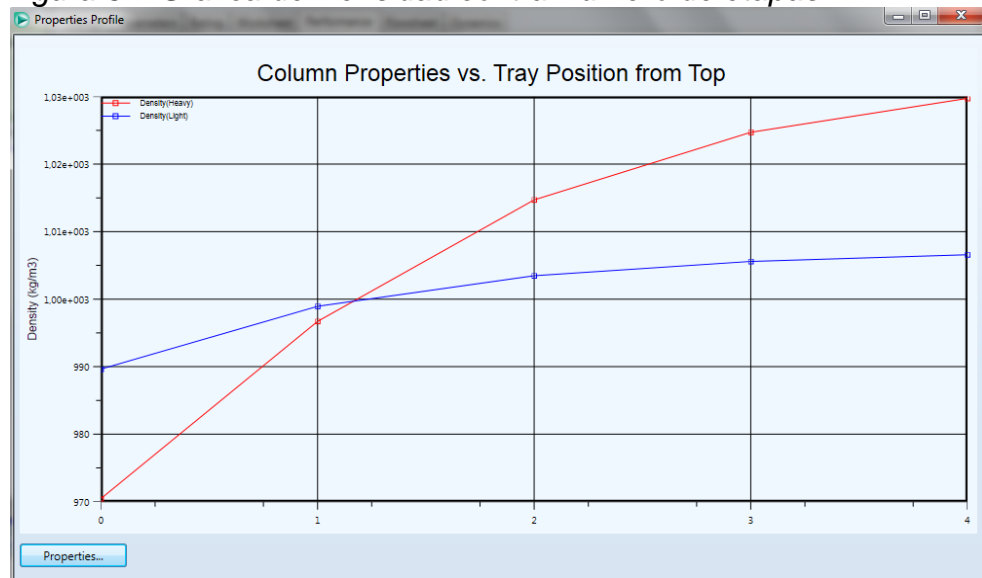
Feeds		F	S
Flow Rate (kg/h)		1,6597	1,6140
H2O		0,7500	0,0000
Ethanol		0,2500	0,0000
BZol		0,0000	1,0000

Products		E1	R5
Flow Rate (kg/h)		2,2838	0,9899
H2O		0,1428	0,9281
Ethanol		0,1800	0,0038
BZol		0,6772	0,0681

Fuente: Aspen Hysys v8.6

Se puede observar en la gráfica de densidad (Figura 61) que a medida que ocurre la operación el soluto que se encuentra en la fase ligera, que en este caso es el etanol en la alimentación, pasa a la fase pesada que es el solvente de extracción, esto ocurre en la segunda y tercera etapa de la columna. De acuerdo a la simulación se puede decir que se extrajo aproximadamente un 72% de etanol durante la operación.

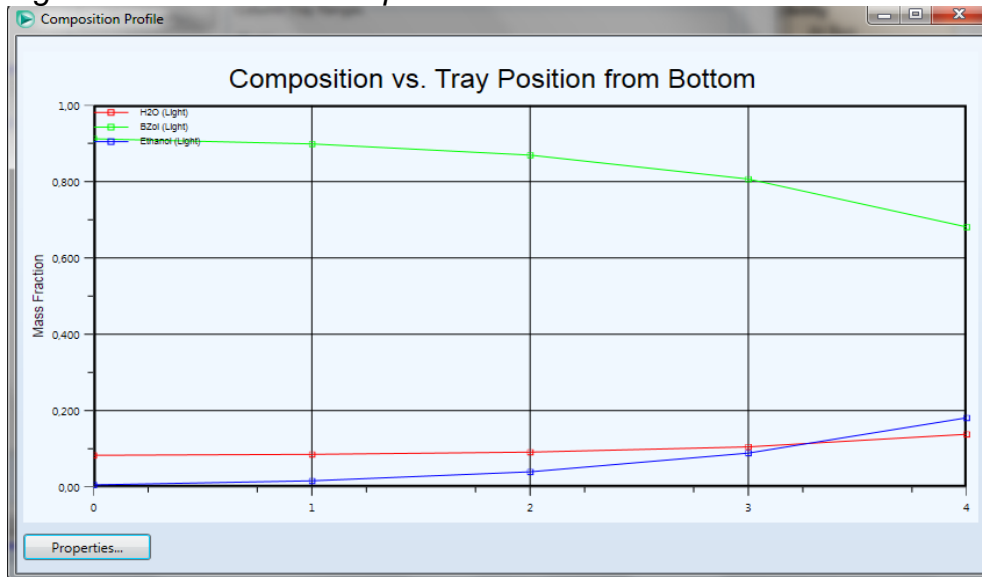
Figura 61. Grafica de Densidad contra Número de etapas.



Fuente: Aspen Hysys v8.6

De la gráfica de las composiciones del extracto final en la Figura 62 se puede deducir que se extrajo un buen porcentaje de etanol, por lo cual su composición aumenta, la disminución del alcohol bencílico durante las etapas se debe a la integración del etanol en este, y el agua permanece constante debido a que esta no es miscible con el alcohol bencílico y la gran parte de etanol que hay en esta es transferida al alcohol.

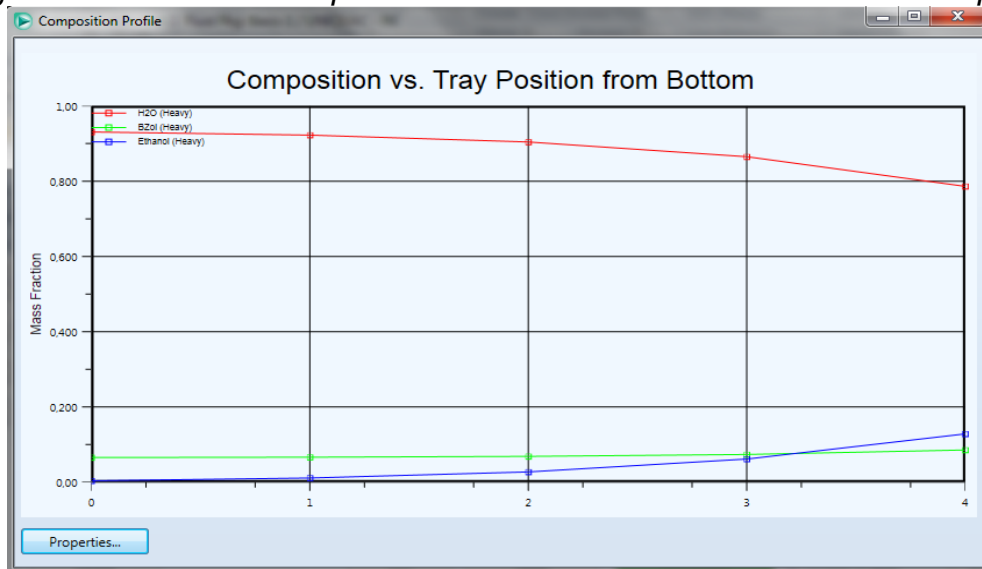
Figura 62. Grafica de Composiciones del extracto contra Número de etapas.



Fuente: Aspen Hysys v8.6

En la figura 63 se observa el comportamiento de las composiciones en el refinado de acuerdo a las etapas, se puede deducir que una mínima parte del etanol quedo en el refinado, es decir no se extrajo totalmente, debido a la polaridad que tiene con el Agua, por eso su aumento a través de las etapas; el agua disminuye porque el etanol presente en la solución y el alcohol bencílico permanece constante ya que este no es miscible en el agua y es muy mínima la parte que puede permanecer en el agua.

Figura 63. Grafica de composiciones del refinado contra Número de etapas.



Fuente: Aspen Hysys v8.6

7.CONCLUSIONES

Con base en guías para presentar un informe de diseño detallado y un estudio preliminar sobre los antecedentes, detallando las condiciones específicas y aplicando los conocimientos aprendidos, se realizó el dimensionamiento de una columna de extracción líquido-líquido de platos perforados a escala laboratorio por medio de módulos de 200 mm de alto y 50 mm de diámetro conectados entre sí y de platos perforados de 3 mm de diámetro y 27 agujeros organizados de forma triangular para que la fase dispersa pase a través de estos en forma de gotas y se redispersen, de igual forma se dimensionaron unos tubos de descenso por los cuales fluye la fase continua de la torre para combinarse con la fase dispersa; sin olvidar las buenas prácticas de ingeniería se desarrolló a nivel conceptual un prototipo didáctico, fácil de manejar y a un precio rentable.

Se pudo evaluar y seleccionar a partir del método Electre el tipo de columna de extracción líquido-líquido óptimo teniendo en cuenta factores como el costo inicial, la complejidad de la construcción, los costos de mantenimiento, el escalado, la flexibilidad del proceso, el tiempo de residencia y los dispositivos auxiliares. (Tabla 12). De acuerdo a la selección se concluyó que la columna de extracción líquido-líquido de platos perforados mencionada anteriormente se adapta a las condiciones requeridas.

Una vez seleccionada la configuración interna de la columna, se procedió a seleccionar y evaluar a partir del método Electre el material ideal para construir la torre teniendo en cuenta 5 alternativas como el polimetilacrilato, el polipropileno, el politetrafluoroetileno, el vidrio de borosilicato y el aluminio; concluyendo al final que el material más óptimo es el Polipropileno debido a sus propiedades químicas y a su bajo costo comercial.

De igual forma se describieron los sistemas complementarios necesarios para el funcionamiento de la torre como lo son los tanques de almacenamiento de la alimentación, el disolvente de extracción, extracto y refinado, los sistemas de conducción del líquido, las bombas de alimentación de las entradas a la torre, los accesorios para el muestreo y la disposición de estos en la columna y el diseño de la estructura de soporte para la columna de extracción, la mayoría de estos sistemas presenta su hoja de especificaciones (Tabla 30) y además se realizó un análisis de riesgos de la operación de la torre con sus posibles causas, consecuencias y medidas de control para tener precauciones a la hora de poner en marcha la columna.

El diseño de la columna de extracción líquido-líquido finalmente se concluye con la estimación de costos y presupuestos del prototipo donde se explicó la estimación de los costos de cada una de las partes de la columna a escala laboratorio

comercial, como sugerencia del valor monetario que tendría adquirir un equipo similar a las características establecidas en la torre de separación construida, para terminar con el detalle de la inversión económica realizada en el prototipo de extracción mencionado anteriormente.

Una vez realizada la construcción del prototipo de extracción líquido-líquido se procedió a realizar pruebas con este, no sin antes tener en cuenta los factores que influyen en la selección del solvente adecuado para usar en la operación en donde se tuvieron en cuenta la toxicidad, inflamabilidad, reactividad violenta, si el solvente es corrosivo, la manipulación de este, la facilidad de análisis, la recuperabilidad, la disponibilidad en el mercado y su costo de adquisición (TABLA 1 Y 2 PRUEBAS), finalmente se seleccionó el alcohol bencílico por sus propiedades químicas y su fácil adquisición. Los cálculos teóricos y experimentales se detallan mejor en el capítulo de pruebas y la forma de operación de la torre se describe en el manual de operación y la guía de laboratorio del mismo capítulo, de igual manera se puede concluir que la eficiencia experimental de extracción de 65.91% con el equilibrio ternario Agua-Etanol y Alcohol bencílico, frente a un 93.40% de eficiencia calculada teóricamente, con lo cual se calculó un rendimiento del 70% para la torre de separación construida, siendo este un valor muy favorable para una extracción líquido-líquido, lo que quiere decir que gran parte del etanol fue extraído de la mezcla de alimentación.

Finalmente se realizó una simulación con el software de simulación de procesos de la industria energética ASPEN HYSYS versión 8,6 para observar el comportamiento de la columna de extracción teniendo en cuenta algunos factores como la presión y temperatura, con el fin de observar la eficiencia de la operación y analizar los resultados que se obtengan de ella, de esta manera se pudo concluir que la extracción en la torre también fue de un 70% respecto al equilibrio estudiado lo que significa la comprobación de los datos experimentales, permitiendo concluir que al aplicar la columna en la extracción de etanol de una corriente de agua mediante alcohol bencílico, se obtuvo una eficiencia de extracción satisfactoria.

8.RECOMENDACIONES

Se recomienda tener en cuenta el estudio planteado en este trabajo para un futuro mejoramiento de la columna de extracción líquido-líquido, como primera instancia se recomienda considerar el cambio de los sistemas complementarios como los sistemas de conducción del líquido, para lo cual la mejor opción de adquisición son las tuberías de politetrafluoroetileno siendo este el material más común y resistente usado en los procesos de extracción; de igual forma se recomienda el cambio de las bombas de alimentación y disolvente de extracción para las entradas a la columna, siendo la mejor opción de adquisición las bombas reciprocantes o bombas de desplazamiento positivo debido a su modo de operación y su resistencia frente a los compuestos químicos; los accesorios para la torre son otra de las consideraciones a tener en cuenta, la mejor opción para el cambio de estos son los acoples hembra rápido aire a espiga manguera de aluminio por su resistencia química, debido a que los acoples de bronce se puede oxidar por el contacto con los compuestos. Sin olvidar también el debido mantenimiento de la estructura que soporta la columna, vigilando que esta no se deteriore.

Es necesario tener en cuenta los parámetros a seguir para la selección del solvente con el fin de que este no deteriore la columna o cause algún accidente en esta, y como prioridad se recomienda seguir al pie de la letra el manual de operación y la guía de laboratorio propuesta en este documento al momento de poner en marcha la torre teniendo en cuenta las debidas precauciones mencionadas en este para una exitosa operación del equipo de extracción.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ocon, J. and G. Tojo, *Problemas de Ingeniería Química (operaciones básicas) España: Editorial Aguilar*. 1978.
2. Geankoplis, C., *Transport processes and separation process principles (includes unit operations)*. 2003: Prentice Hall Press.
3. Seader, J.D. and E.J. Henley, *Separation process principles*. 2011.
4. Jara, A.A., *Fundamentos y Aplicaciones de Transferencia de Masa*. 2 ed. 2011. 189.
5. Treybal, R.E., *Operaciones de transferencia de masa*. 1988.
6. Molina Paguay, J.D. and F.M. Pacheco Reinoso, *Diseño y construcción de un Extractor líquido-líquido para un Sistema Ternario*. 2015.
7. *Extracción Líquido-Líquido*. Available from: http://www.ub.edu/obla/obla%20castellano/extraccio_tip.html.
8. Rodríguez, H.R.R., *Diseño, Construcción y Operación de una Columna de Extracción Líquido-Líquido de Platos Perforados-Edición Única*. 1966.
9. Henley, E.J. and J.D. Seader, *Operaciones de separación por etapas de equilibrio en ingeniería química*. 1988: Reverté.
10. Abdeltawab, A.A., et al., *Separation of La and Ce with PC-88A by counter-current mixer-settler extraction column*. Separation and Purification Technology, 2002. **26**(2): p. 265-272.
11. Seibert, A. and D. Moosberg, *Performance of spray, sieve tray, and packed contactors for high pressure extraction*. Separation Science and Technology, 1988. **23**(12-13): p. 2049-2063.
12. Kirou, V., et al., *Flooding, holdup, and drop size measurements in a multistage column extractor*. AIChE journal, 1988. **34**(2): p. 283-292.
13. Pietzsch, W. and E. Blass, *A new method for the prediction of liquid pulsed sieve-tray extractors*. Chemical engineering & technology, 1987. **10**(1): p. 73-86.
14. Scheibel, E.G. and A.E. Karr, *Semicommercial Multistage Extraction Column-Performance Characteristics*. Industrial & Engineering Chemistry, 1950. **42**(6): p. 1048-1057.
15. Komazawa, I. and J. Ingham, *Effect of system properties on the performance of Liquid—Liquid extraction columns—II: Oldshue—Rushton column*. Chemical Engineering Science, 1978. **33**(4): p. 479-485.
16. Steiner, L., A. Kumar, and S. Hartland, *Determination and correlation of axial-mixing parameters in an agitated liquid-liquid extraction column*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1988. **66**(2): p. 241-247.
17. Kentish, S.E., G.W. Stevens, and H. Pratt, *Estimation of coalescence and breakage rate constants within a Kühni column*. Industrial & engineering chemistry research, 1998. **37**(3): p. 1099-1106.
18. Karr, A.E., *Performance of a reciprocating-plate extraction column*. AIChE Journal, 1959. **5**(4): p. 446-452.
19. Alva García, P., *Tipos de contacto en la extracción líquido-líquido*. 2013.
20. ROSEN, E., *Steady state chemical process simulation*. AIChE Journal (Vol. 21, No. 3), 1975: p. 417.
21. Rodríguez, M.G., J.L.S. Cebrián, and A.G. Callejo, *Estudio y simulación del proceso de producción de biodiésel: Aplicación a la predicción de las propiedades físicas*. 2013.

22. *Simulación de Procesos en Ingeniería Química*. 2011; Available from: <http://modeladoysimulacioneniqu.webnode.es/simulacion-en-ee/simulacion-de-procesos-quimicos-usando-aspen-plus/>.
23. Górák, A. and Z. Olujić, *Distillation: equipment and processes*. 2014: Academic Press.
24. Reissinger, K. and J. Schroter, *Selection criteria for liquid-liquid extractors*. Chemical Engineering, 1978. **85**(25): p. 109-118.
25. Solimo, H.N., H.E. Martinez, and R. Riggio, *Liquid-liquid extraction of ethanol from aqueous solutions with amyl acetate, benzyl alcohol, and methyl isobutyl ketone at 298.15 K*. Journal of Chemical and Engineering Data, 1989. **34**(2): p. 176-179.
26. Towler, G. and R.K. Sinnott, *Chemical engineering design: principles, practice and economics of plant and process design*. 2012: Elsevier.
27. Maduro, R.M. and M. Aznar, *Liquid-liquid equilibrium of ternary systems 1-butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate + aromatic + aliphatic*. Fluid Phase Equilibria, 2008. **265**(1-2): p. 129-138.
28. Lobato Scharfhausen, M., *Diseño de una Columna de Extracción Líquido-Líquido de Platos Perforados a Escala de Planta Piloto*. 2016.
29. Seider, W.D., J.D. Seader, and D.R. Lewin, *PRODUCT & PROCESS DESIGN PRINCIPLES: SYNTHESIS, ANALYSIS AND EVALUATION, (With CD)*. 2009: John Wiley & Sons.
30. Schwarcz, J., *The Right Chemistry: 108 Enlightening, Nutritious, Health-Conscious and Occasionally Bizarre Inquiries into the Science of Daily Life*. 2012: Doubleday Canada.
31. ARLIE, J., *Commodity Thermoplastics, París: Editions Technip*. 1990, ISBN 2-7108-0591-X.
32. Kaplan, S., E. Lopata, and J. Smith, *Plasma processes and adhesive bonding of polytetrafluoroethylene*. Surface and interface analysis, 1993. **20**(5): p. 331-336.
33. Ordoñez, J., et al., *ROBOT DE EXPLORACIÓN DE CAÑOS PARA ALCANTARILLA" DESARROLLO COMO SOLUCIÓN A UN PROBLEMA LOCAL"*.
34. GUTIÉRREZ, L.G., *Teoría de la medición de caudales y volúmenes de agua e instrumental necesario disponible en el mercado*. 2012.
35. Northup, A.H., et al., *Liquid-liquid extraction apparatus and method*. 2005, Google Patents.
36. Megyesy, F., *Manual de recipientes a presión*. 2000: limusa.
37. *Guía rápida de Acoples Industriales*.
38. Turton, R., et al., *Analysis, synthesis and design of chemical processes*. 2008: Pearson Education.
39. Española, R.A., *Diccionario de la lengua española, 2014*. Madrid. Disponible en línea: <http://dle.rae.es>.
40. Boulandier, J.J., et al., *Manual de Extinción de Incendios*. Pamplona, España: Cuerpo de Bomberos de Seattle (2008). Estadísticas de incendios en edificios USA, 2001.
41. Singh, R. and N.B. Dahotre, *Corrosion degradation and prevention by surface modification of biometallic materials*. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 2007. **18**(5): p. 725-751.
42. Giraldo, R.D.O., *Manual de técnicas de laboratorio químico*. 2009: Universidad de Antioquia.
43. *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo*.
44. *Elementos Químicos Ltda*.

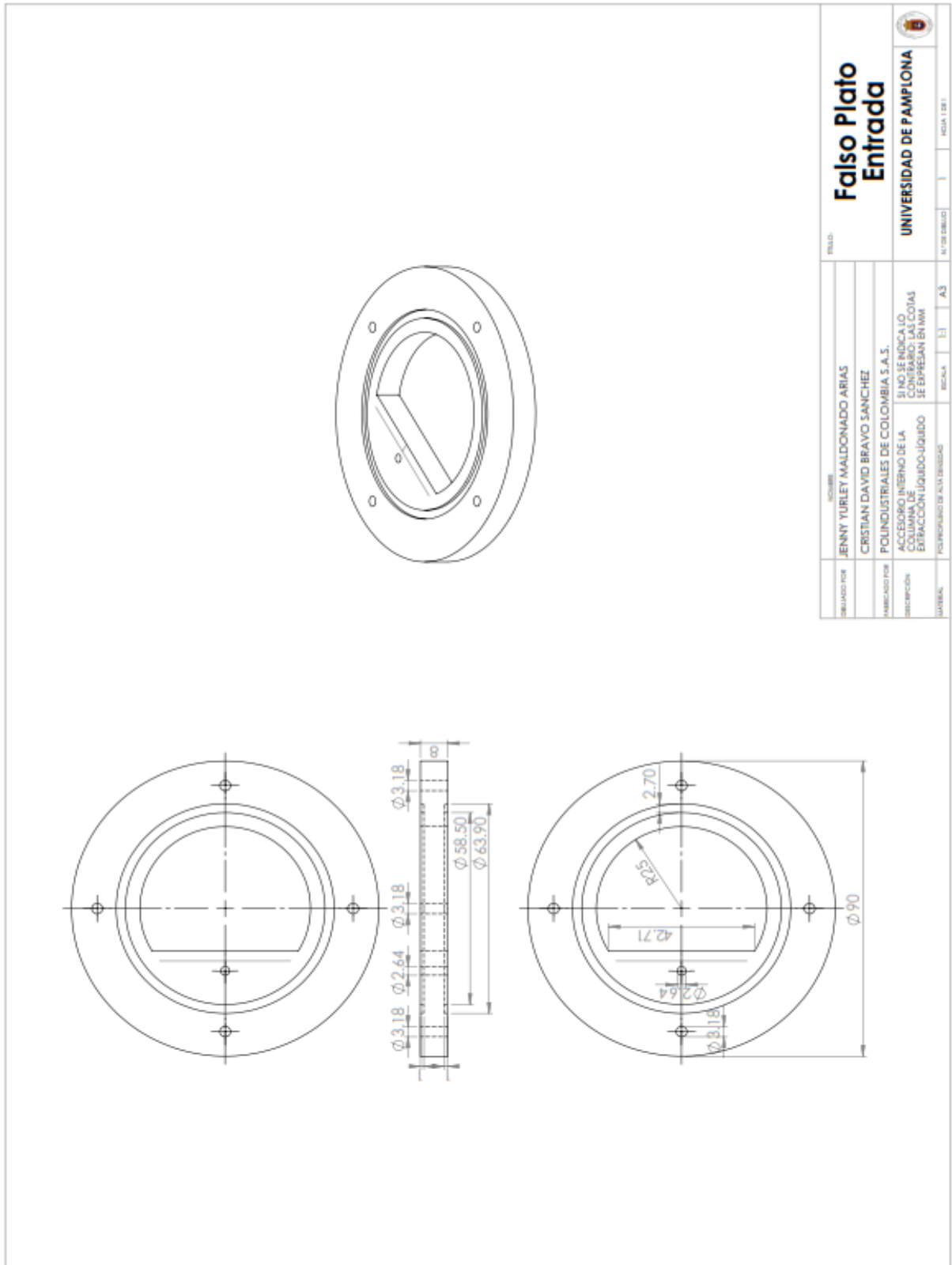
ANEXOS

Anexo A. Tabla para el Cálculo del radio de prueba

R*	L*	A*	R*	L*	A*	R*	L*	A*
0,03	0,341	0,0087	0,09	0,572	0,0446	0,15	0,714	0,0941
0,031	0,347	0,0092	0,091	0,575	0,0453	0,151	0,716	0,095
0,032	0,352	0,0096	0,092	0,578	0,046	0,152	0,718	0,0959
0,033	0,357	0,0101	0,093	0,581	0,0468	0,153	0,72	0,0968
0,034	0,362	0,0105	0,094	0,584	0,0475	0,154	0,722	0,0977
0,035	0,368	0,011	0,095	0,586	0,0483	0,155	0,724	0,0986
0,036	0,373	0,0115	0,096	0,589	0,049	0,156	0,726	0,0996
0,037	0,378	0,0119	0,097	0,592	0,0498	0,157	0,728	0,1005
0,038	0,382	0,0124	0,098	0,595	0,0505	0,158	0,729	0,1014
0,039	0,387	0,0129	0,099	0,597	0,0513	0,159	0,731	0,1023
0,04	0,392	0,0134	0,1	0,6	0,052	0,16	0,733	0,1033
0,041	0,397	0,0139	0,101	0,603	0,0528	0,161	0,735	0,1042
0,042	0,401	0,0144	0,102	0,605	0,0536	0,162	0,737	0,1051
0,043	0,405	0,0149	0,103	0,608	0,0544	0,163	0,739	0,1061
0,044	0,41	0,0155	0,104	0,611	0,0551	0,164	0,741	0,107
0,045	0,415	0,016	0,105	0,613	0,0559	0,165	0,742	0,108
0,046	0,419	0,0165	0,106	0,616	0,0567	0,166	0,744	0,1089
0,047	0,423	0,0171	0,107	0,618	0,0575	0,167	0,746	0,1099
0,048	0,428	0,0176	0,108	0,621	0,0583	0,168	0,748	0,1108
0,049	0,432	0,0181	0,109	0,623	0,0591	0,169	0,75	0,1118
0,05	0,435	0,0187	0,11	0,626	0,0598	0,17	0,751	0,1127
0,051	0,44	0,0193	0,111	0,628	0,0606	0,171	0,753	0,1137
0,052	0,444	0,0198	0,112	0,631	0,0614	0,172	0,755	0,1146
0,053	0,448	0,0204	0,113	0,633	0,0623	0,173	0,756	0,1156
0,054	0,452	0,021	0,114	0,636	0,0631	0,174	0,758	0,1166
0,055	0,456	0,0215	0,115	0,638	0,0639	0,175	0,76	0,1175
0,056	0,46	0,0221	0,116	0,64	0,0647	0,176	0,762	0,1185
0,057	0,464	0,0227	0,117	0,643	0,0655	0,177	0,763	0,1195
0,058	0,467	0,0233	0,118	0,645	0,0663	0,178	0,765	0,1204
0,059	0,471	0,0239	0,119	0,648	0,0671	0,179	0,767	0,1214
0,06	0,475	0,0245	0,12	0,65	0,068	0,18	0,768	0,1224
0,061	0,479	0,251	0,121	0,652	0,0688	0,181	0,77	0,1234
0,062	0,482	0,0257	0,122	0,655	0,0696	0,182	0,772	0,1244
0,063	0,488	0,0263	0,123	0,657	0,0705	0,183	0,773	0,1253
0,064	0,49	0,027	0,124	0,659	0,0713	0,184	0,775	0,1263

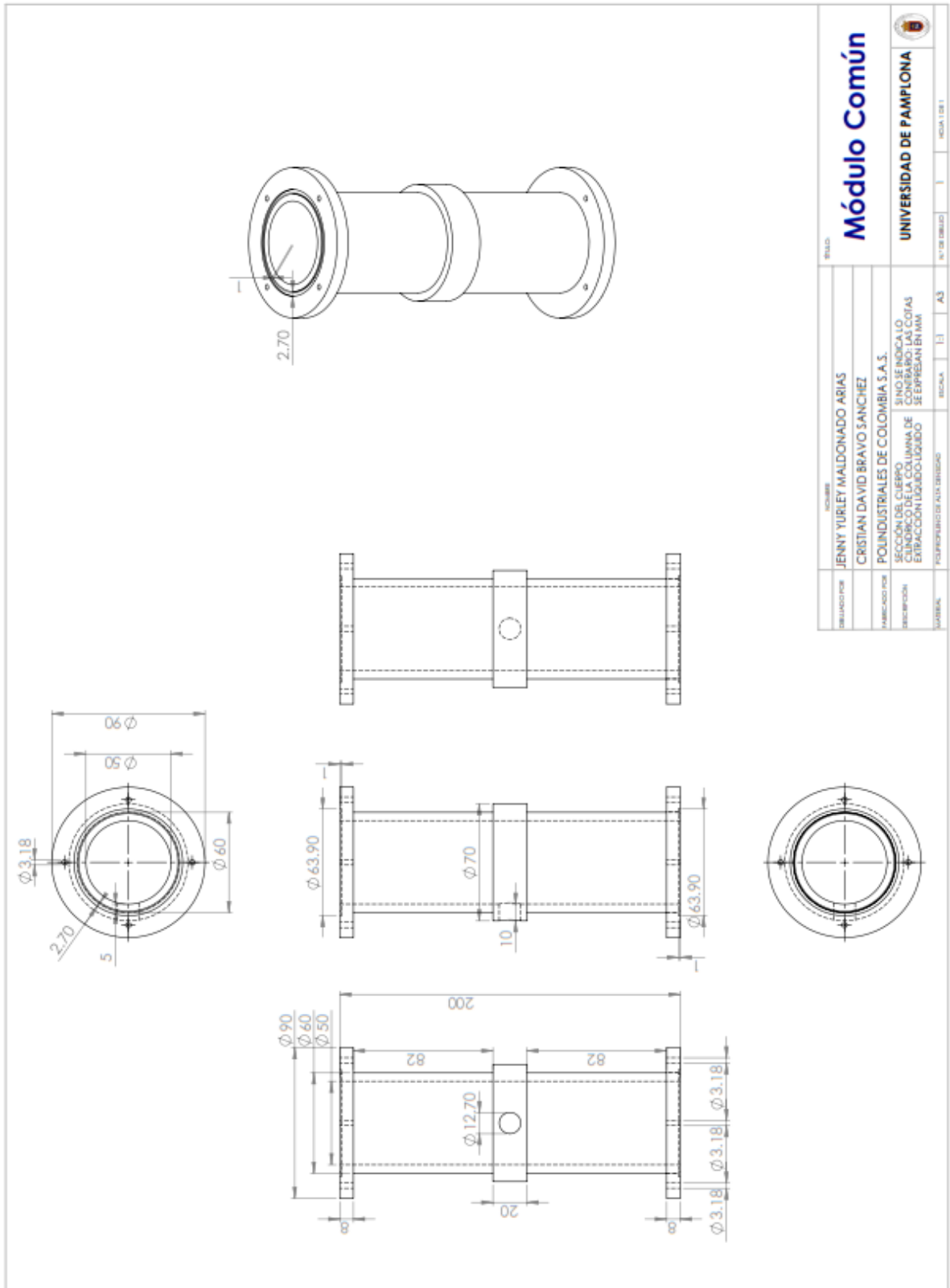
0,065	0,493	0,0276	0,125	0,661	0,0721	0,185	0,777	0,1273
0,066	0,497	0,0282	0,126	0,664	0,073	0,186	0,778	0,1283
0,067	0,5	0,0288	0,127	0,666	0,0738	0,187	0,78	0,1293
0,068	0,503	0,0295	0,128	0,668	0,0747	0,188	0,781	0,1303
0,069	0,507	0,0301	0,129	0,67	0,0755	0,189	0,783	0,1313
0,07	0,51	0,0308	0,13	0,673	0,0764	0,19	0,785	0,1323
0,071	0,514	0,0314	0,131	0,675	0,0773	0,191	0,786	0,1333
0,072	0,517	0,0321	0,132	0,677	0,0781	0,192	0,788	0,1343
0,073	0,52	0,0327	0,133	0,679	0,079	0,193	0,789	0,1353
0,074	0,524	0,0334	0,134	0,681	0,0798	0,194	0,791	0,1363
0,075	0,527	0,0341	0,135	0,683	0,0807	0,195	0,792	0,1373
0,076	0,53	0,0347	0,136	0,686	0,0816	0,196	0,794	0,1383
0,077	0,533	0,0354	0,137	0,688	0,0825	0,197	0,795	0,1393
0,078	0,536	0,0361	0,138	0,69	0,0833	0,198	0,797	0,1403
0,079	0,539	0,0368	0,139	0,692	0,0842	0,199	0,798	0,1414
0,08	0,543	0,0375	0,14	0,694	0,0851	0,2	0,8	0,1424
0,081	0,546	0,0382	0,141	0,696	0,086	0,201	0,801	0,1434
0,082	0,549	0,0389	0,142	0,698	0,0869	0,202	0,803	0,1444
0,083	0,552	0,0395	0,143	0,7	0,0878	0,203	0,804	0,1454
0,084	0,555	0,0403	0,144	0,702	0,0886	0,204	0,806	0,1465
0,085	0,558	0,041	0,145	0,704	0,0895	0,205	0,807	0,1475
0,086	0,561	0,0417	0,146	0,706	0,0904	0,206	0,809	0,1485
0,087	0,564	0,0424	0,147	0,708	0,0913	0,207	0,81	0,1496
0,088	0,567	0,0431	0,148	0,71	0,0922	0,208	0,812	0,1506
0,089	0,569	0,0439	0,149	0,712	0,0932	0,209	0,813	0,1516

Anexo B. Plano de las vistas del falso plato.

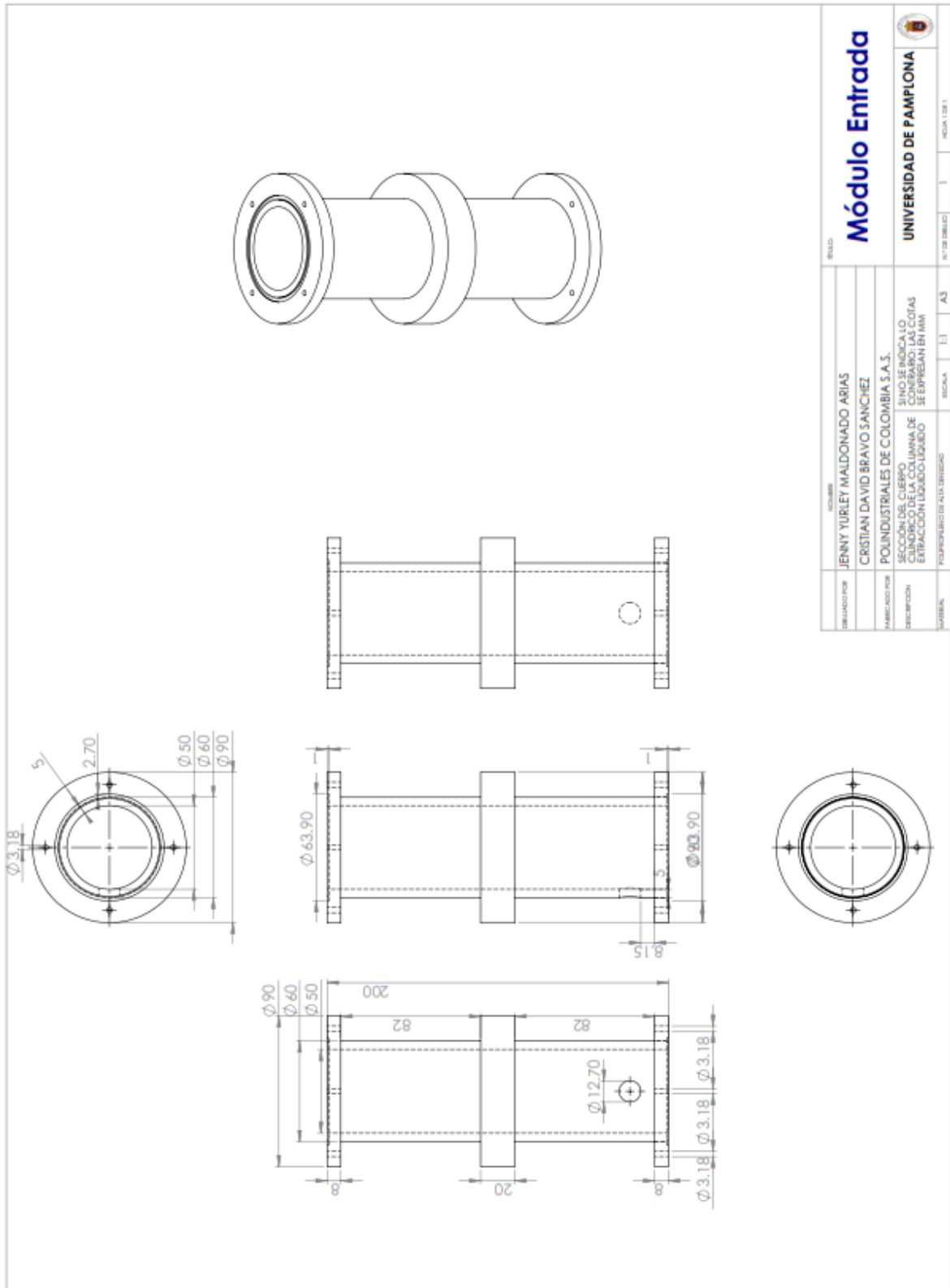


ELABORADO POR	JENNY YURILEY MALDONADO ARIAS	FECHA:	
DISEÑADO POR	CRISTIAN DAVID BRAVO SANCHEZ	Nº DE DISEÑO:	
ELABORADO POR	POLINDUSTRIALES DE COLOMBIA S.A.S.	ESCALA:	1:1
SECCIÓN	ACCESORIO INTERNO DE LA COLUMNA DE EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO	HOJA:	A3
UNIVERSIDAD	UNIVERSIDAD DE PAMPLONA	Nº DE DISEÑO:	
		ESCALA:	1:1

Anexo C. Plano de las vistas del módulo común.

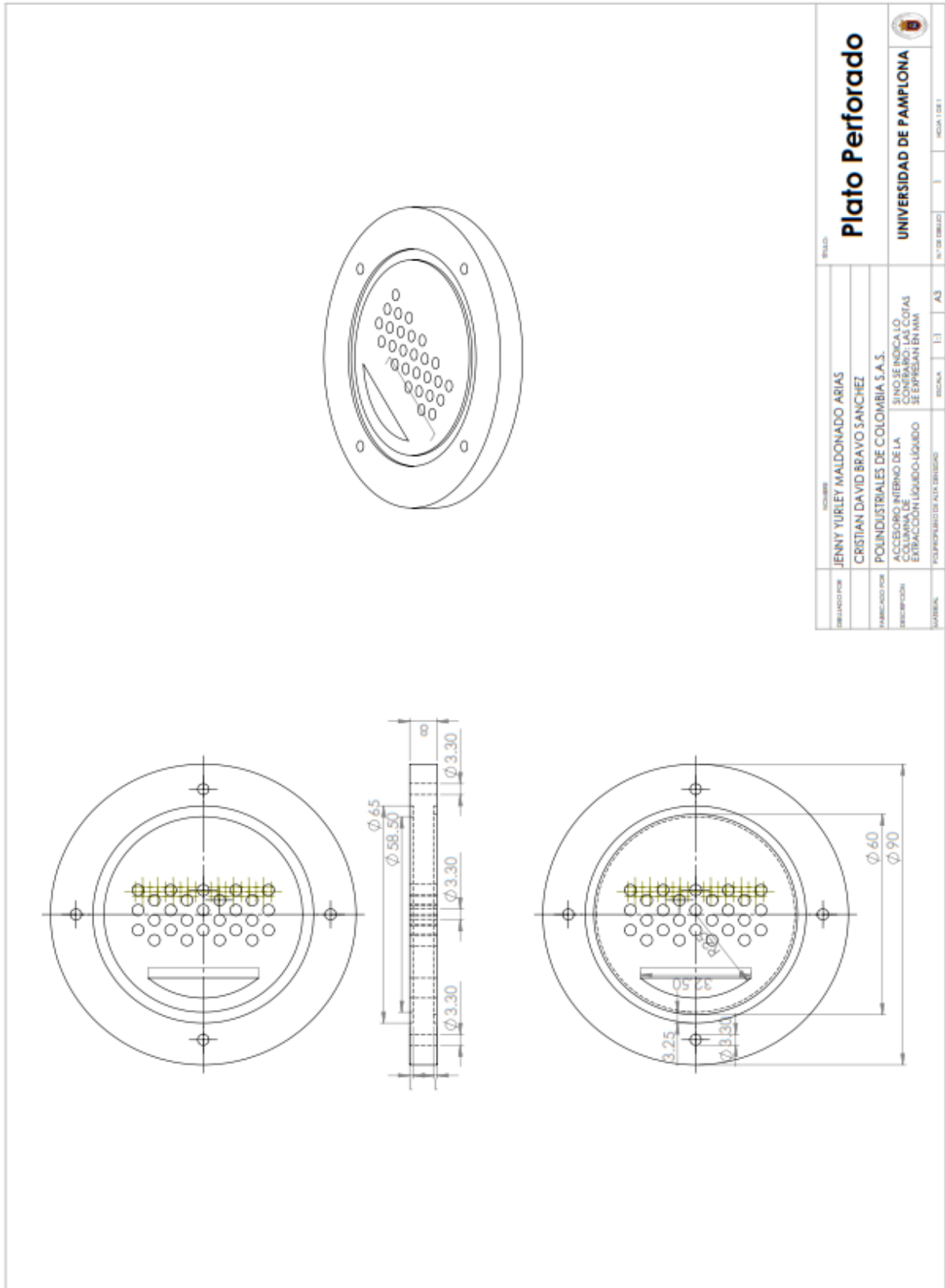


Anexo D. Plano de las vistas del módulo de entrada.

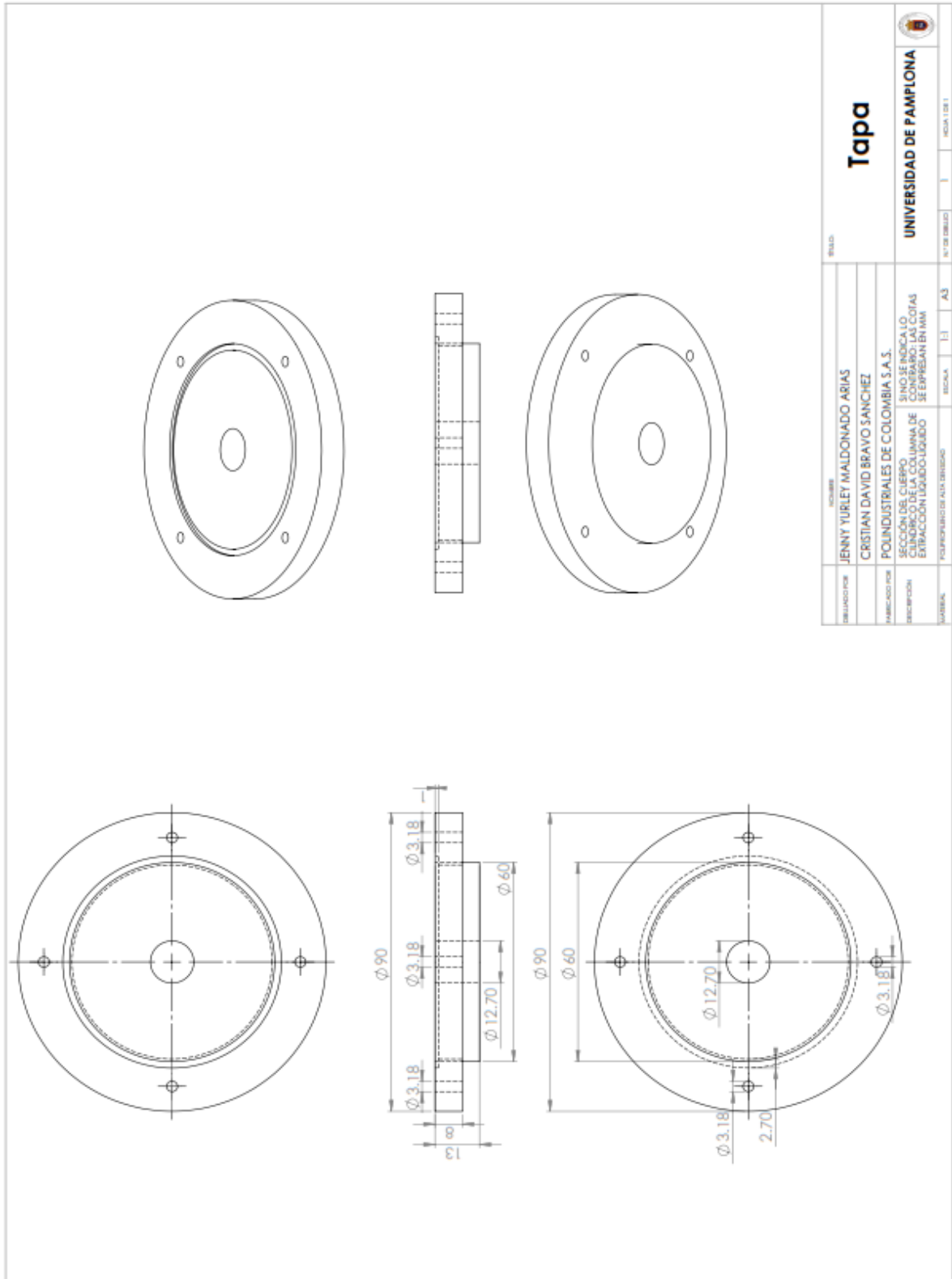


ELABORADO POR	REVISADO	MÓDULO	
JENNY YURLEY MALDONADO ARIAS		Módulo Entrada	
DISEÑADO POR		UNIVERSIDAD DE PAMPLONA	
CRISTIAN DAVID BRAVO SANCHEZ			
FABRICADO POR		POLIINDUSTRIALES DE COLOMBIA S.A.S.	
DESCRIPCIÓN		SECCIONES CILINDROS CLIMOROL EN COLUMNA DE EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO SE EXPRESAN EN MM	
AUTORIA		ESCALA	1:1 A3
		N.º DE DISEÑO	MDA1 DE 1

Anexo E. Plano de las vistas del plato perforado.

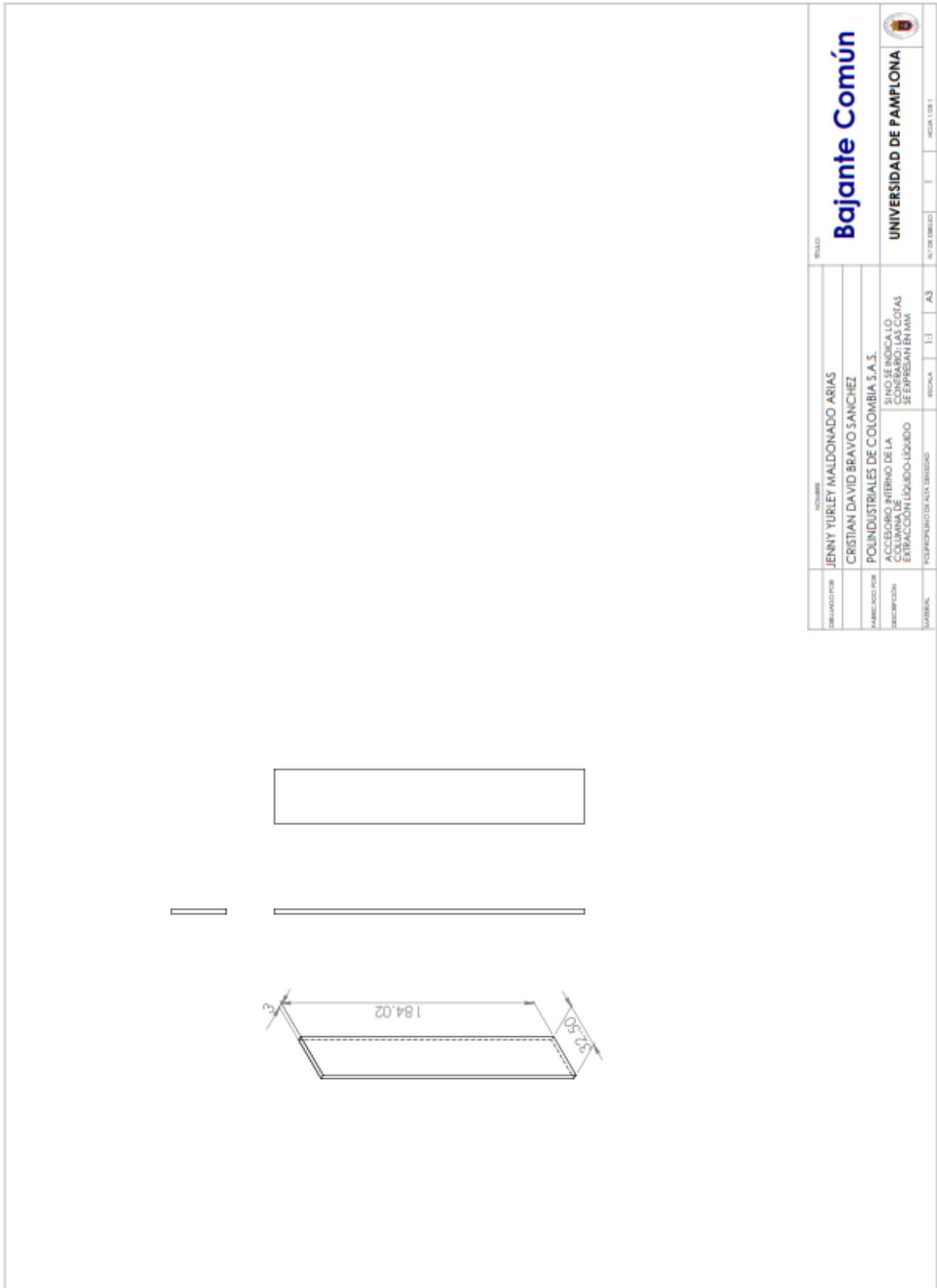


Anexo F. Plano de las vistas de la tapa.



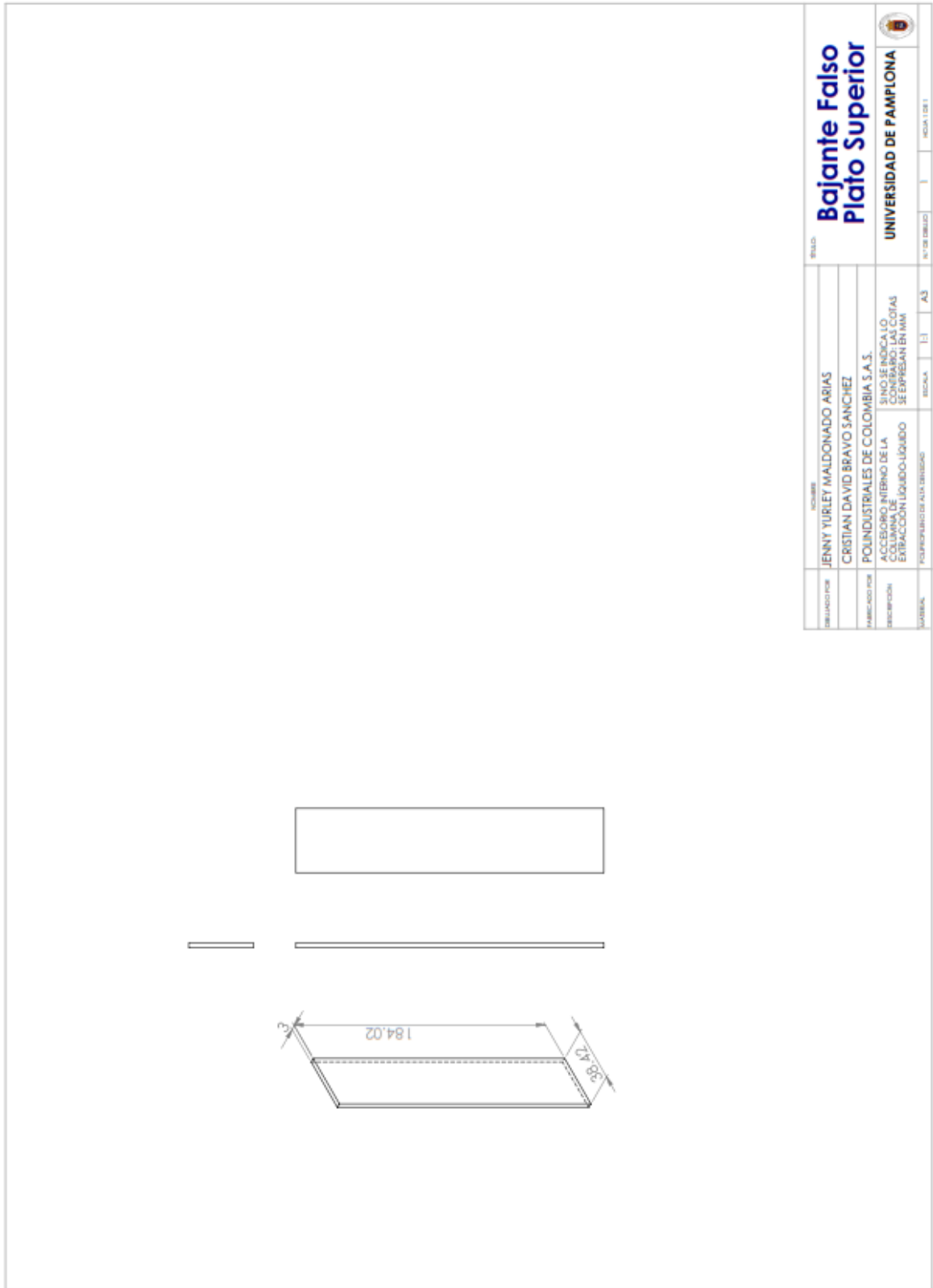
PROYECTANTE	JENNY YURLEY MALDONADO ARIAS	ESCUELA	INGENIERIA	
DISEÑADOR	CRISTIAN DAVID BRAVO SANCHEZ	SECCION	A3	
FABRICADO POR	INDUSTRIALES DE COLOMBIA S.A.S.	PROYECTO	UNIVERSIDAD DE PAMPLONA	
DESCRIPCION	SECCION DEL CUERPO DE LA TAPA DE LA LAMINA DE ENTUBACION DE ALACON DEBIDO A LA ENTUBACION EN LA TAPA	FECHA	NOVA 1 2011	
UNIDAD	INDUSTRIALES DE COLOMBIA S.A.S.	PROYECTO	UNIVERSIDAD DE PAMPLONA	

Anexo G. Plano de las vistas del bajante común.



DESIGNADO POR	REVISADO	Escala	
JENNY YURLEY MALDONADO ARIAS		Bajante Común	
ELABORADO POR		N.º DE DISEÑO	N.º DE 1 DE 1
CRISTIAN DAVID BRAVO SANCHEZ			
FABRICADO POR			
POLINDUSTRIALES DE COLOMBIA S.A.S.			
DESCRIPCION			
ACCESORIO EN FERRO DE LA EXTRACCION LIQUIDO-LIQUIDO SE EMPREGAN EN N.M.			
UNIDAD			
POLIPROPILENO DE ALTA DENSIDAD			

Anexo I. Plano de las vistas del bajante del falso plato superior.



ELABORADO POR	REVISADO	ESCALA		N.º DE DIBUJO		MATERIAL	
JENNY YURLEY MALDONADO ARIAS	JENNY YURLEY MALDONADO ARIAS	1:1		A3		ACERO	
DISEÑADO POR	CRISTIAN DAVID BRAVO SANCHEZ	<p>Bajante Falso Plato Superior</p>					
FABRICADO POR	POLINDUSTRIALES DE COLOMBIA S.A.S.	<p>UNIVERSIDAD DE PAMPLONA</p>					
DESCRIPCION	ACCESORIO INTERNO DE LA COLUMNA DE EXTRACCION LIQUIDO-LIQUIDO SE EMPRESAN EN MM.	<p>SE NO SE INDICALO CONTRA LAS COTIAS SE EMPRESAN EN MM.</p>					
CLASIFICACION	PLATEADO DE ALU BRISADO	<p>INDICACION</p>					

Anexo K. Diagrama de flujo del proceso.

