



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA COLUMNA DE
EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO PARA EL LABORATORIO
DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA FACULTAD DE
CIENCIAS-ESPOCH**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO/A QUÍMICO/A

AUTORES:

MARÍA JOSÉ TOBAR HEREDIA

JHON ANIBAL CHUCHUCA LEÓN

Riobamba – Ecuador

2023



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA COLUMNA DE
EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO PARA EL LABORATORIO
DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA FACULTAD DE
CIENCIAS-ESPOCH**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO/A QUÍMICO/A

AUTORES:

MARÍA JOSÉ TOBAR HEREDIA

JHON ANIBAL CHUCHUCA LEÓN

DIRECTOR: ING. CÉSAR ARTURO PUENTE GUIJARRO, PhD.

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, María José Tobar Heredia & Jhon Anibal Chuchuca León

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Nosotros, María José Tobar Heredia y Jhon Anibal Chuchuca León, declaramos que el presente Trabajo de Integración Curricular es de nuestra autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 12 de abril de 2023



María José Tobar Heredia
0953921186






Jhon Anibal Chuchuca León
0705732048

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: el Trabajo de Integración Curricular; tipo: Proyecto Técnico, **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA COLUMNA DE EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO PARA EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA FACULTAD DE CIENCIAS - ESPOCH**, realizado por la señorita: **MARIA JOSE TOBAR HEREDIA** y el señor: **JHON ANIBAL CHUCHUCA LEÓN**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Segundo Hugo Calderón, MSc. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2023-04-12
Ing. César Arturo Puentes Guíjarro, PhD. DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-04-12
Ing. Mónica Lilián Andrade Avalos, MSc. ASESORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-04-12

DEDICATORIA

A todas las mujeres de ingeniería, seres valiosos y únicos, quienes permiten que la ciencia y la tecnología contribuyan al desarrollo de la sociedad, quienes hacen de este mundo un lugar mejor y en especial a mi madre Mónica Elizabeth, una mujer maravillosa, digna de toda admiración y de quién aprendí a ser fuerte, perseverante y a no rendirme jamás.

María

A mi madre y a mi hermana por apoyarme a lo largo de mis años de estudio.

Jhon

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme la fortaleza y la sabiduría para seguir adelante y vencer todo obstáculo presentado durante mis años de estudio. A mi madre, quien me ha brindado su amor incondicional siempre y por quien soy lo que soy. A mis hermanos: Moisés, Mateo y Letty por su apoyo y amor fraterno. A mi abuelita Letty por su alegría ejemplar y su amor. A la Escuela Superior Politécnica del Litoral, por formarme durante mis primeros años de ingeniería y enseñarme que no existen límites para alcanzar la grandeza. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por permitirme continuar y finalizar mi ingeniería. A mis profesores: Hugo Calderón, Valeria Tapia y Darío Guamán; verdaderos maestros, quienes me brindaron confianza, amistad y enseñanzas de vida con calidad humana. A mis buenos amigos de ingeniería con quienes compartí bellas experiencias y permitieron que los días de clases se llenen de felicidad. Una y mil veces: gracias.

María

A mi madre Margarita por concederme su amor cada día de mi vida, a quien le debo todos mis logros alcanzados. A mis abuelos por su amor desde siempre. A hermana por su apoyo a lo largo de mis años de estudio. A la Universidad Central del Ecuador por brindarme la formación inicial de ingeniería. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por recibirme y permitirme culminar mis estudios.

Jhon

A nuestro director Ing. César Puente por su confianza y respaldo en el desarrollo de este trabajo. A nuestra asesora Ing. Mónica Andrade, por su guía oportuna y su predisposición para ayudarnos.

María y Jhon

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiv
RESUMEN.....	xv
SUMMARY/ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1.	DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....	2
1.1.	Antecedentes.....	2
1.2.	Planteamiento del problema.....	3
1.3.	Justificación.....	4
1.4.	Objetivos.....	5
1.4.1.	<i>Objetivo general</i>	5
1.4.2.	<i>Objetivos específicos</i>	5

CAPÍTULO II

2.	MARCO TEÓRICO.....	6
2.1.	Antecedentes de la investigación.....	6
2.2.	Referencias teóricas.....	7
2.2.1.	<i>Extracción líquido-líquido</i>	7
2.2.1.1.	<i>Mezcla de alimentación</i>	7
2.2.1.2.	<i>Solvente</i>	7
2.2.1.3.	<i>Extracto</i>	7
2.2.1.4.	<i>Refinado</i>	7
2.2.2.	<i>Criterios para elección del solvente adecuado</i>	8
2.2.2.1.	<i>Capacidad de carga</i>	8
2.2.2.2.	<i>Coeficiente de partición o de reparto (K_p)</i>	8
2.2.2.3.	<i>Selectividad</i>	9
2.2.2.4.	<i>Estabilidad</i>	9
2.2.2.5.	<i>Diferencia de densidad</i>	9

2.2.2.6.	<i>Viscosidad</i>	9
2.2.2.7.	<i>Tensión interfacial</i>	10
2.2.2.8.	<i>Recuperabilidad</i>	10
2.2.2.9.	<i>Seguridad</i>	10
2.2.3.	<i>Métodos gráficos para diseño de equipos de extracción líquido-líquido</i>	10
2.2.3.1.	<i>Equilibrio de fases</i>	10
2.2.3.2.	<i>Diagrama triangular equilátero</i>	10
2.2.3.3.	<i>Método de McCabe-Thiele</i>	11
2.2.4.	<i>Tipos de sistemas de extracción líquida</i>	12
2.2.4.1.	<i>Sistema de tres componentes con un par parcialmente miscible</i>	12
2.2.4.2.	<i>Sistema de tres componentes con dos pares parcialmente miscibles</i>	13
2.2.5.	<i>Variables que influyen en la extracción líquido-líquido</i>	14
2.2.5.1.	<i>Efecto de la presión</i>	14
2.2.5.2.	<i>Efecto de la temperatura</i>	14
2.2.6.	<i>Tipos de extracción líquida</i>	14
2.2.6.1.	<i>Extracción en una sola etapa</i>	14
2.2.6.2.	<i>Extracción por etapas múltiples en contracorriente</i>	15
2.2.6.3.	<i>Extracción en etapas múltiples por corriente cruzada</i>	15
2.2.7.	<i>Equipos de extracción y principio de funcionamiento</i>	16
2.2.8.	<i>Tipos de equipos de extracción líquida</i>	17
2.2.8.1.	<i>Mezcladores-agitadores</i>	17
2.2.8.2.	<i>Columna con rellenos</i>	18
2.2.8.3.	<i>Columna con platos perforados</i>	19
2.2.8.4.	<i>Columna con placas deflectoras</i>	19
2.2.8.5.	<i>Columna de aspersion</i>	20
2.2.8.6.	<i>Extractor con agitación mecánica</i>	21
2.2.8.7.	<i>Columna Scheibel</i>	21
2.2.8.8.	<i>Columna Karr</i>	23
2.2.8.9.	<i>Columna Kuhni</i>	23
2.2.8.10.	<i>Columna de extracción con plataforma giratoria (RDC)</i>	24
2.2.8.11.	<i>Columnas de pulsos</i>	25
2.3.9.	<i>Normativas empleadas para el diseño de equipos de extracción</i>	26
2.3.9.1.	<i>Código ASME</i>	26
2.3.9.2.	<i>Norma ASME B31.3</i>	27
2.3.9.3.	<i>Norma ASTM</i>	27
2.3.9.4.	<i>Norma AISI</i>	27

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	28
3.1.	Caracterización del sistema ternario	28
3.1.1.	<i>Densidad</i>	28
3.1.2.	<i>Viscosidad</i>	28
3.1.3.	<i>Tensión interfacial</i>	29
3.2.	Condiciones de operación	29
3.2.1.	<i>Presión</i>	29
3.2.2.	<i>Temperatura</i>	29
3.3.	Diseño de la columna de extracción	29
3.4.	Normativa para la construcción del equipo	29
3.5.	Selección de materiales de construcción	29
3.5.1.	<i>Vidrio borosilicato 3.3</i>	29
3.5.2.	<i>Acero inoxidable AISI 304</i>	30
3.5.3.	<i>Malla plástica de polietileno</i>	31
3.5.4.	<i>Acero estructural ASTM A36</i>	31
3.6.	Ingeniería del proyecto	32
3.6.1.	<i>Cálculos para el dimensionamiento de la columna de extracción</i>	32
3.6.1.2.	<i>Alimentación de la columna</i>	32
3.6.1.3.	<i>Determinación del número de etapas teóricas y reales</i>	32
3.6.1.4.	<i>Altura de la columna</i>	35
3.6.1.5.	<i>Diámetro de la columna</i>	36
3.6.1.6.	<i>Esbeltez</i>	36
3.6.1.7.	<i>Volumen de mallas</i>	37
3.6.1.8.	<i>Volumen de la columna</i>	38
3.6.2.	<i>Cálculos para dimensionamiento del sistema hidráulico</i>	38
3.6.2.1.	<i>Tramo 1</i>	39
3.6.2.2.	<i>Tramo 2</i>	40
3.6.2.3.	<i>Tramo 3</i>	41
3.6.2.4.	<i>Tramo 4</i>	42
3.6.3.	<i>Cálculos para el dimensionamiento del sistema de agitación</i>	43
3.6.4.	<i>Cálculos para el dimensionamiento del sistema de soporte</i>	43
3.7.	Cálculos para determinación de la eficiencia de extracción y rendimiento	44
3.7.1.	<i>Representación gráfica del balance de masa para el sistema de extracción</i>	44
3.7.2.	<i>Cálculos teóricos para balance de masa</i>	44

3.7.2.1.	<i>Determinación del Coeficiente de reparto</i>	45
3.7.2.2.	<i>Densidad de la mezcla</i>	45
3.7.2.3.	<i>Volumen de la mezcla de alimentación</i>	46
3.7.2.4.	<i>Volumen del solvente de extracción</i>	46
3.7.2.5.	<i>Masa de alimentación</i>	46
3.7.2.6.	<i>Masa de solvente (agua)</i>	46
3.7.2.7.	<i>Balance de masa para el etanol</i>	47
3.7.2.8.	<i>Balance de masa para la gasolina</i>	47
3.7.2.9.	<i>Balance de masa para el solvente (agua)</i>	47
3.7.2.10.	<i>Masa del extracto</i>	48
3.7.2.11.	<i>Fracción de etanol y solvente en el extracto</i>	49
3.7.2.12.	<i>Masa del refinado</i>	49
3.7.2.13.	<i>Fracción de etanol y gasolina en el refinado</i>	49
3.7.2.14.	<i>Eficiencia teórica de extracción</i>	50
3.7.3.	<i>Cálculos experimentales para balance de masa</i>	50
3.7.3.1.	<i>Valores de índices de refracción</i>	50
3.7.3.2.	<i>Volumen real de la columna</i>	51
3.7.3.3.	<i>Volumen disponible</i>	51
3.7.3.4.	<i>Volumen de mezcla utilizada</i>	51
3.7.3.5.	<i>Densidad de la mezcla</i>	51
3.7.3.6.	<i>Masa de la mezcla</i>	52
3.7.3.7.	<i>Masa de etanol en la mezcla</i>	52
3.7.3.8.	<i>Masa de gasolina en la mezcla</i>	52
3.7.3.9.	<i>Volumen de solvente utilizado</i>	53
3.7.3.10.	<i>Masa de solvente</i>	53
3.7.3.11.	<i>Concentración de etanol en el extracto</i>	53
3.7.3.12.	<i>Fracción de etanol en el extracto</i>	53
3.7.3.13.	<i>Concentración del agua en el extracto</i>	53
3.7.3.14.	<i>Fracción de agua en el extracto</i>	54
3.7.3.15.	<i>Masa de agua extracto</i>	54
3.7.3.16.	<i>Masa del etanol en el extracto</i>	54
3.7.3.17.	<i>Masa de gasolina en el refinado</i>	54
3.7.3.18.	<i>Masa de etanol en el refinado</i>	55
3.7.3.19.	<i>Fracción del etanol en el refinado</i>	55
3.7.3.20.	<i>Concentración del etanol en el refinado</i>	55
3.7.3.21.	<i>Fracción de la gasolina en el refinado</i>	55

3.7.3.22.	<i>Concentración de gasolina en el refinado</i>	56
3.7.3.23.	<i>Eficiencia experimental de extracción</i>	56
3.7.4.	Rendimiento del equipo	56
3.8.	Simulación del modelo del equipo	57
3.9.	Construcción del extractor L/L	58
3.9.1.	<i>Tubo tipo columna</i>	58
3.9.2.	<i>Mecanismo de agitación y mallas de relleno</i>	58
3.9.2.1.	<i>Especificaciones técnicas del motor</i>	59
3.9.3.	<i>Tuberías y accesorios</i>	59
3.9.3.1.	<i>Especificaciones técnicas de flujómetros de panel con válvula</i>	60
3.9.4.	<i>Tanques de almacenamiento</i>	60
3.9.5.	<i>Estructura de soporte del equipo</i>	61
3.10.	Procedimientos y equipos para la construcción	62
3.10.1.	<i>Soplado</i>	62
3.10.2.	<i>Corte y perforaciones</i>	62
3.10.3.	<i>Soldadura</i>	62
3.10.4.	<i>Torneado</i>	63
3.10.5.	<i>Ranurados</i>	63
3.10.6.	<i>Pintado</i>	64

CAPÍTULO IV

4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	65
4.1.	Resultados del dimensionamiento del equipo	65
4.2.	Resultados del balance de masa del sistema de extracción	67
4.2.1.	<i>Resultados de fracciones en el extracto</i>	67
4.2.2.	<i>Resultado de fracciones en el refinado</i>	68
4.3.	Eficiencia de extracción	69
4.4.	Rendimiento del equipo	70
4.5.	Análisis financiero	70

CONCLUSIONES.....72

RECOMENDACIONES..... 73

BIBLIOGRAFÍA..... 1

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2:	Características del funcionamiento de equipos comerciales para extracción.....	16
Tabla 1-3:	Densidades de las sustancias del proceso de extracción.....	28
Tabla 2-3:	Viscosidades de las sustancias del proceso de extracción.....	28
Tabla 3-3:	Características del Borosilicato 3.3.....	30
Tabla 4-3:	Características del acero inoxidable AISI 304.....	30
Tabla 5-3:	Características de las mallas de polietileno.....	31
Tabla 6-3:	Características del acero estructural ASTM 036.....	31
Tabla 7-3:	Datos equilibrio del sistema agua-gasolina-etanol.....	32
Tabla 8-3:	Líneas de reparto extracto en <i>ProSimTernaryDiagram</i>	32
Tabla 9-3:	Líneas de reparto refinado en <i>ProSimTernaryDiagram</i>	33
Tabla 10-3:	Características del funcionamiento de equipos comerciales para extracción.....	34
Tabla 11-3:	Diámetros para columnas empaquetadas.....	36
Tabla 12-3:	Velocidad de fluidos en tuberías.....	39
Tabla 13-3:	Características de las tuberías de acero.....	45
Tabla 14-3:	Coefficientes de reparto en extracto y refinado	51
Tabla 15-3:	Índice de refracción de las soluciones	44
Tabla 1-4:	Dimensionamiento de la columna de extracción L/L	66
Tabla 2-4:	Resultados del dimensionamiento del sistema de tuberías.....	66
Tabla 3-4:	Resultados del dimensionamiento del sistema de agitación.....	67
Tabla 4-4:	Dimensionamiento de las estructuras.....	67
Tabla 5-4:	Fracciones máxicas en el extracto.....	67
Tabla 6-4:	Fracciones máxicas en el refinado.....	68
Tabla 7-4:	Eficiencias de extracción.....	69
Tabla 8-4:	Costo del equipo construido.....	71

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-2:	Esquema del proceso de extracción.....	8
Ilustración 2-2:	Diagrama triangular del sistema acetona-MIK-agua.....	11
Ilustración 3-2:	Diagrama de McCabe Thiele para la extracción de acetona.....	12
Ilustración 4-2:	Sistema ternario con un par miscible.....	13
Ilustración 5-2:	Sistema ternario con dos pares miscibles.....	13
Ilustración 6-2:	Efecto de la temperatura sobre un sistema ternario	14
Ilustración 7-2:	Sistema de extracción en una sola etapa.....	15
Ilustración 8-2:	Sistema de extracción en varias etapas a contracorriente.....	15
Ilustración 9-2:	Sistema de extracción en varias etapas por corriente cruzada.....	16
Ilustración 10-2:	Equipo de extracción mezclador-sedimentador.....	18
Ilustración 11-2:	Columna de extracción con rellenos.....	18
Ilustración 12-2:	Columna de extracción con platos perforados.....	19
Ilustración 13-2:	a) Columna con platos perforados, b) Columna <i>Scheibel</i>	20
Ilustración 14-2:	Columna de aspersion o spray.....	21
Ilustración 15-2:	Columna de extracción <i>Scheibel</i>	22
Ilustración 16-2:	Columna de extracción Karr.....	23
Ilustración 17-2:	Platos de la columna Kuhni.....	24
Ilustración 18-2:	Columna de extracción Kuhni.....	24
Ilustración 19-2:	Columna de pulsos.....	25
Ilustración 20-2:	Extractor centrífugo.....	26
Ilustración 1-3:	Número de etapas en <i>ProSimTernaryDiagram</i>	33
Ilustración 2-3:	Balance de masa en el sistema de extracción: gasolina-etanol-agua.....	44
Ilustración 3-3:	Vista frontal y posterior del equipo.....	57
Ilustración 4-3:	Visualización 3D posterior y lateral del equipo.....	57
Ilustración 5-3:	Columna de vidrio borosilicato 3.3.....	58
Ilustración 6-3:	Chumaceras y poleas conectadas al eje.....	59
Ilustración 7-3:	Tubería con válvula tipo bola.....	60
Ilustración 8-3:	Tanques de acero inoxidable.....	61
Ilustración 9-3:	Estructura principal y secundaria.....	61
Ilustración 10-3:	Sopladora para vidrio.....	62
Ilustración 11-3:	Sierra para metales.....	62
Ilustración 12-3:	Soldadora MIG y TIG.....	63
Ilustración 13-3:	Torno.....	63

Ilustración 14-3:	Roscadora eléctrica.....	63
Ilustración 15-3:	Compresor para pintura.....	64
Ilustración 1-4:	Fracciones másicas de etanol y agua en el extracto.....	68
Ilustración 2-4:	Fracciones másicas de etanol y gasolina en el refinado.....	69
Ilustración 3-4:	Eficiencia teórica y experimental de extracción.....	70

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: PASTA

ANEXO B: PORTADA

ANEXO C: DERECHO DE AUTOR (COPYRIGHT)

ANEXO D: PLANO DEL EQUIPO CONSTRUIDO

ANEXO E: MANUAL DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

ANEXO F: GUÍA PARA PRÁCTICA DE LABORATORIO

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de titulación fue implementar una columna de extracción líquido-líquido tipo Scheibel, para la separación de mezclas binarias mediante solventes. Este equipo está disponible para su uso en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias-ESPOCH, para complementar la parte teórica con la experimental en el ámbito educativo. El diseño de la columna se basó en criterios como: la elección de la mezcla y el solvente adecuado en base a sus características; además de la determinación de parámetros de diseño como: el número de etapas, altura, diámetro, esbeltez y volumen de mallas. Dentro de las variables de diseño del sistema hidráulico y del sistema de agitación resaltan el diámetro de tuberías y la velocidad de rotación del eje. Una vez que se establecieron estos valores, se construyó una torre con altura de 1,20 m, diámetro interno de 7 cm y capacidad de 3,45 L. En la parte superior de la estructura de soporte, se colocaron dos tanques de almacenamiento con una capacidad de 6,80 L cada uno, para la entrada de la mezcla y el solvente que dan inicio al proceso de extracción. Posterior a la instalación del equipo, se realizó un ensayo demostrativo mediante la extracción de etanol de la gasolina por acción de agua como solvente extractor, logrando disminuir la concentración del alcohol desde el 50% a un 12% en la mezcla gasolina-etanol. Se concluyó que el extractor líquido diseñado y construido permitió obtener una eficiencia de extracción del 86% y un rendimiento del 88%, lo cual se consideró como un resultado satisfactorio al tratarse de una extracción sin recirculación con relación 1:2 mezcla-solvente. Se recomienda desarrollar más ensayos con el uso de otros sistemas ternarios para evaluar y comparar las eficiencias de extracción entre ellos.

Palabras clave:<COLUMNA DE EXTRACCIÓN>, <MEZCLA BINARIA>, <SOLVENTE>, <EFICIENCIA DE EXTRACCIÓN>, <RENDIMIENTO>, <GASOLINA>, <ETANOL>.

0705-DBRA-UPT-2023

A handwritten signature in black ink is written over a circular stamp. The signature is cursive and appears to read 'Rafael...'. The stamp is faint and circular, with some illegible text around the perimeter.

SUMMARY / ABSTRACT

The aim of this work was to implement a Scheibel type liquid-liquid extraction column for the separation of binary mixtures by means of solvents. This equipment is available for use in the Unit Operations Laboratory of the Faculty of Sciences-ESPOCH, to complement the theoretical part with the experimental part in the educational environment. The design of the column was based on criteria such as: the choice of the mixture and the appropriate solvent based on its characteristics; in addition to the determination of design parameters such as: number of stages, height, diameter, slenderness and mesh volume. Among the design variables of the hydraulic system and the agitation system, the pipe diameter and the shaft rotation speed stand out. Once these values were established, a tower with a height of 1,20 m, an internal diameter of 7 cm and a capacity of 3,45 L was built. In the upper part of the support structure, two storage tanks with a capacity of 6,80 L each were placed for the inlet of the mixture and the solvent that initiate the extraction process. After the installation of the equipment, a demonstration test was carried out by extracting ethanol from gasoline by the action of water as an extracting solvent, achieving a decrease in the alcohol concentration from 50% to 12% in the gasoline-ethanol mixture. It was concluded that the liquid extractor designed and constructed allowed obtaining an extraction efficiency of 86% and a yield of 88%, which was considered a satisfactory result for a non-recirculating extraction with a 1:2 mixture-solvent ratio. It is recommended to develop more trials with the use of other ternary systems to evaluate and compare the extraction efficiencies between them.

Keywords:<EXTRACTION COLUMN>, <BINARY MIXTURE>, <SOLVENT>, <EXTRACTION EFFICIENCY>, <YIELD>, <GASOLINE>, <ETHANOL>.



Dra. Nanci Margarita Inca Chunata, Mgs.

0602926719

INTRODUCCIÓN

El presente Trabajo de Integración Curricular se fundamenta en el diseño y construcción de una columna de extracción líquido-líquido para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Este equipo permite evidenciar y estudiar experimentalmente los principios de la extracción como técnica eficaz en la separación de un determinado compuesto presente en una mezcla homogénea líquida. La columna de extracción ayuda a estudiantes de diferentes escuelas como Ingeniería Química, Ingeniería Ambiental y Bioquímica/Farmacia a complementar el aprendizaje experimental con los conocimientos teóricos por medio de la realización de prácticas de extracción líquida dentro del laboratorio.

La extracción líquida es una operación unitaria de gran utilidad a escala industrial debido a que presenta ventajas en comparación con otros procedimientos de separación de sustancias como la destilación y evaporación; entre las cuales resaltan sus condiciones seguras de operación que no requieren de trabajar a elevadas temperaturas y presiones. El principio de la técnica de extracción líquida radica en la diferencia de solubilidad de determinadas sustancias que permite su separación. El uso de una sustancia en estado líquido, denominada solvente es clave para la separación del compuesto deseado presente en una mezcla homogénea líquida.

Como objetivos de este trabajo se plantea: determinar los parámetros ingenieriles de diseño para el dimensionamiento del equipo propuesto, mediante revisión bibliográfica; construir la columna de extracción tipo *Scheibel* para sistemas ternarios en base al diseño de ingeniería; cuantificar las concentraciones de las sustancias que componen el extracto y refinado para el cálculo de la eficiencia de extracción, con la finalidad de realizar la validación del equipo y establecer el manual de funcionamiento de la columna de extracción, para su manejo adecuado y una guía de prácticas de laboratorio que contribuyan al desarrollo de habilidades y destrezas de los estudiantes con un criterio analítico.

Se presentan resultados de pruebas experimentales de extracción con el sistema ternario etanol-gasolina-agua, donde el agua actúa como solvente de extracción y permite separar el etanol, debido a diferencia de solubilidad que presenta este con los dos disolventes. Un aspecto relevante es la agitación mecánica, característica propia del diseño de la columna *Scheibel*, ya que ayuda a agilizar el proceso de extracción para obtener un buen rendimiento y eficiencia de extracción. Este diseño es uno de los más utilizados a nivel industrial para la separación de compuestos líquidos porque brinda excelentes resultados en diferentes industrias tales como: farmacéutica, refinación de petróleo, producción de aceites y tratamiento de aguas residuales.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

La extracción por solvente es uno de los procedimientos más antiguos y eficaces que se han utilizado a lo largo de la historia de la humanidad para la separación de sustancias específicas. Hasta el siglo XIX, la extracción líquido-líquido se empleaba para separar componentes como perfumes y tintes de fuentes naturales; a finales de este siglo, la extracción líquida se convirtió en una importante y muy útil técnica a escala de laboratorio. A comienzos del siglo XX, con el surgimiento y consolidación de la Ingeniería Química como profesión, el proceso de extracción se diseñó y se estableció como una técnica de separación a escala industrial (Perry, 2019, p.1452).

La extracción líquido-líquido es una operación unitaria que involucra la transferencia de masa en la separación de las sustancias que componen una mezcla líquida homogénea, gracias a la acción de un solvente que tiene contacto con una mezcla líquida que contiene la sustancia de interés (Treybal, 1998, 529). La extracción líquida es una alternativa eficaz y de gran utilidad a nivel industrial cuando otras operaciones unitarias como la evaporación y destilación se convierten en procedimientos complicados para la obtención de un determinado compuesto químico, debido a las elevadas temperaturas de operación que pueden afectar las propiedades de las sustancias con las cuales se está trabajando (McCabe et al., 2007: p.808).

El estudio de la extracción líquida permite el desarrollo de nuevos procedimientos, amigables con el medio ambiente para la obtención de productos útiles a escala industrial. El trabajo *“Green extraction processes, biorefineries and sustainability: Recovery of high added-value products from natural sources”* de los autores Herrero e Ibañez (2018: pp.252-259) analiza la extracción como una técnica sostenible, mediante el uso de solventes respetuosos con el medio ambiente, entre ellos los fluidos supercríticos que son sustancias eficaces para obtención de lípidos en biorrefinerías. Los autores Santos et. Al (2018: pp.984-990) en su estudio *“Liquid-liquid equilibrium for ternary system containing biodiesel, methanol and water”*, concluyen que las columnas de extracción son muy efectivas y económicas para separar el metanol del biodiesel.

Las columnas de extracción líquido-líquido poseen un bajo costo de operación en comparación con las torres de destilación porque no necesitan elevado suministro energético. La extracción líquido-líquido ofrece condiciones de operación flexibles y permite trabajar con sustancias altamente volátiles, sin riesgo de sufrir su descomposición térmica (Perry, 2019, p.1452). La extracción líquida es ampliamente utilizada en diferentes procesos industriales tales como:

separación de compuestos aromáticos del petróleo, obtención de penicilina, separación de ácidos grasos presentes en aceites vegetales, tratamiento de aguas residuales, separación de metales y purificación de diversas sustancias (Treybal, 1998, p.530).

El diseño y construcción de columnas de extracción se ha convertido en un tema fundamental que necesita de constante desarrollo e innovación dentro del campo de estudio y aplicación de la Ingeniería Química. La extracción líquida constituye un capítulo relevante en el sílabo de Operaciones Unitarias II, que se imparte como una de las asignaturas de la unidad profesional de Ingeniería Química en universidades y escuelas politécnicas del mundo entero. Esta técnica de separación de sustancias también es importante dentro del plan de estudios de otras carreras como: Ingeniería Ambiental y Bioquímica/Farmacía.

En el trabajo de “Diseño de una columna de extracción líquido-líquido de platos perforados a escala de plan piloto” realizado en la Universidad de Cádiz por Lobato (2016: pp.33-40), se diseña y se establece un sistema para extraer ácido acético mezclado con metilisobutilcetona mediante el uso de agua como solvente. El equipo que permite realizar una réplica a pequeña escala del proceso de extracción a nivel industrial. En este trabajo se concluye que el ácido acético puede ser recuperado de forma más económica por extracción en comparación con la destilación.

Otro trabajo a destacar es el “Diseño y construcción de un módulo de extracción líquido-líquido para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Tecnología Química de la Universidad Tecnológica de Pereira”, realizado por Arias y Rodríguez (2016: pp.32-38), en el cual se utilizó el sistema ternario de etanol, agua y aceite de ricino para el estudio del proceso de extracción, la obtención de datos experimentales y los diagramas ternarios. Los autores concluyen que es necesario utilizar rellenos con aberturas grandes para facilitar el paso de mezclas con elevada viscosidad como en el caso de los aceites vegetales.

1.2. Planteamiento del problema

El Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias - ESPOCH, no dispone de un equipo de extracción líquido-líquido para el proceso de enseñanza y aprendizaje experimental de los fundamentos de la extracción líquida, por lo que surge la necesidad de diseñar, construir e implementar una columna de extracción tipo *Scheibel* para el estudio de sistemas ternarios, que podrá estar al servicio de la comunidad politécnica.

La extracción es uno de los temas estudiados dentro de la asignatura de Operaciones Unitarias II, que se imparte a los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Química. Los estudiantes de las carreras de Bioquímica y Farmacia e Ingeniería Ambiental también requieren del estudio experimental de la técnica de extracción líquida. El conocimiento teórico debe complementarse con el conocimiento experimental que se obtiene únicamente mediante prácticas de laboratorio, las cuales ayudan a los estudiantes a afianzar y evidenciar los principios de la extracción líquido-líquido; una técnica de gran utilidad en varios campos productivos como la industria farmacéutica, obtención de derivados del petróleo, extracción de aceites entre otros.

1.3. Justificación

Las operaciones unitarias constituyen la base para el desarrollo de los procesos industriales y la consolidación de la Ingeniería Química como campo de estudio fundamental en la sociedad actual. Dentro de las operaciones unitarias, la extracción por solvente ofrece muchas ventajas frente a otras operaciones como destilación y evaporación para la separación de determinados componentes dentro de una mezcla líquida homogénea.

La extracción líquida posee numerosas aplicaciones a nivel industrial, entre ellas la separación de compuestos orgánicos como los aceites esenciales, purificaciones, separación de hidrocarburos y procesos de obtención de biomoléculas en industrias: química, bioquímica y farmacéutica. El estudio de esta operación unitaria es de vital importancia dentro de la Ingeniería Química debido a que el proceso es económico, no causa descomposición térmica de los compuestos, no requiere de aditivos químicos y se puede trabajar a presión atmosférica.

Debido a estas razones, se justifica la necesidad de diseñar y construir una columna de extracción líquido-líquido para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH, para que los estudiantes de Ingeniería Química y otras carreras como Ingeniería Ambiental y Bioquímica puedan comprender mejor la utilidad de la extracción líquida a escala de laboratorio, mediante ensayos experimentales con sistemas ternarios donde un solvente permitirá la separación de un componente presente en una mezcla líquida binaria. Este equipo también beneficiará a docentes quienes dispondrán de una herramienta de laboratorio para hacer más didáctico su método de enseñanza y grupos de investigación que necesiten aplicar la técnica de extracción en el desarrollo de sus proyectos.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar y construir una columna de extracción líquido-líquido para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias.

1.4.2. Objetivos específicos

-Determinar los parámetros ingenieriles de diseño para el dimensionamiento del equipo propuesto mediante revisión bibliográfica.

-Construir una columna de extracción tipo *Scheibel* para sistemas ternarios en base al diseño de ingeniería.

-Cuantificar las concentraciones de las sustancias que componen el extracto y refinado para el cálculo de la eficiencia de extracción con la finalidad de realizar la validación del equipo.

-Redactar el manual de funcionamiento de la columna de extracción para su manejo adecuado y una guía de prácticas de laboratorio que contribuyan al desarrollo de habilidades y destrezas de los estudiantes con un criterio analítico.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

El Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo dispone de equipos que están al servicio de docentes y estudiantes para la realización de prácticas de laboratorio y el estudio de los principios de diversas operaciones unitarias. Entre los equipos de laboratorio se tiene una torre de destilación para el estudio de la separación de sustancias por medio de transferencia de masa y energía.

Mediante revisión de los trabajos de titulación de estudiantes de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias de ESPOCH, realizados en la última década; se encontró el trabajo de “Diseño y construcción de un extractor líquido-líquido para un sistema ternario”, realizado por los estudiantes Molina y Pacheco (2015: pp.22-47) en el que se diseñó y construyó una columna de extracción para implementarse en el Laboratorio de Procesos Industriales. Se trabajó con el sistema acetona-agua-metilisobutilcetona para la obtención de datos experimentales de extracción. Se obtuvo un rendimiento del equipo de 84,62% y una eficiencia de extracción de 67,21% para un proceso una sola etapa. Se concluyó que la relación 1:1 de solvente y mezcla de alimentación fue la que permitió alcanzar mayor eficiencia de extracción.

En el trabajo de titulación de “Diseño y construcción de un extractor sólido-líquido para la obtención de aceite de semillas de sambo y zapallo” de González y Yáñez (2012: pp.42-45), estudiantes de Ingeniería Química, se enfocaron en la obtención de aceite vegetal de zapallo y sambo mediante extracción sólido-líquido. Se compararon los resultados de la extracción del equipo con resultados obtenidos mediante ensayos de laboratorio.

Las autoras del trabajo concluyeron que el equipo extractor ofreció mejores resultados que la técnica de extracción *soxhlet* aplicada a escala de laboratorio para la extracción de aceites vegetales. El rendimiento obtenido para los aceites de zapallo y sambo fue de 46,60% y 33,98% en contraste con los resultados de laboratorio que fueron de 45,15% y 30,45% respectivamente. El equipo permitió obtener buenos resultados y replicar el proceso de extracción industrial a escala de laboratorio.

2.2. Referencias teóricas

2.2.1. Extracción líquido-líquido

Es una operación unitaria que involucra la transferencia de masa para la separación de una determinada sustancia, presente en una mezcla en fase líquida y homogénea con ayuda de un solvente adecuado. También conocida como extracción con solvente, se fundamenta en la diferencia de solubilidad del soluto con una de las sustancias presentes en la mezcla, que contiene la sustancia de interés. La extracción permite obtener dos fases de diferentes densidades que posibilitan la separación de la sustancia objetivo (Treybal, 1998, p.527). En todo sistema de extracción líquido-líquido se deben identificar los siguientes términos:

2.2.1.1. Mezcla de alimentación

Esta mezcla en fase líquida ingresa al equipo de extracción y contiene la sustancia a extraer, denominada soluto. Las sustancias que componen esta mezcla son miscibles entre sí y forman una sola fase homogénea.

2.2.1.2. Solvente

Es la sustancia en estado líquido que se utiliza para separar uno de los componentes de la mezcla de alimentación y que posee contacto directo con ella (McCabe et al., 2007: p.809).

2.2.1.3. Extracto

Es la salida rica en solvente y la sustancia que ha sido separada durante el proceso de extracción (McCabe et al., 2007: p.809).

2.2.1.4. Refinado

Es otra corriente de salida compuesta por la o las sustancias que componen la mezcla de alimentación y que se han logrado separar del soluto (sustancia extraída de la mezcla). Esta corriente es pobre en solvente (McCabe et al., 2007: p.809).

El sistema ternario donde actúa un único solvente es el más empleado en los procesos de extracción líquida (ilustración 1-2) pero también existe la posibilidad del uso de dos o más solventes en operaciones de mayor complejidad (McCabe et al., 2007: p.809).

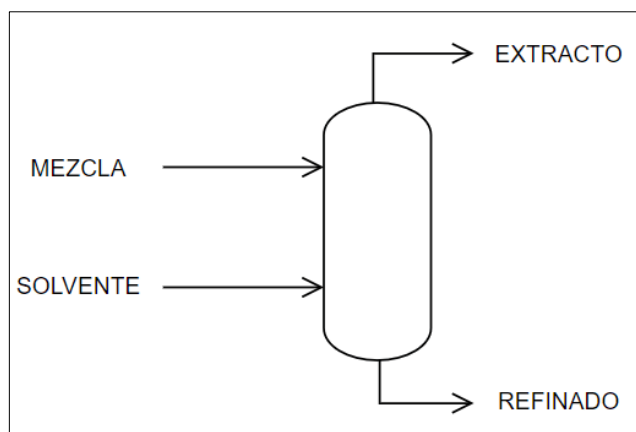


Ilustración 1-2: Esquema del proceso de extracción.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

2.2.2 Criterios para elección del solvente adecuado

Los solventes utilizados para extracción líquida son generalmente orgánicos que pueden ser simples como: ésteres, alcoholes, cetonas, compuestos aromáticos e hidrocarburos y solventes o complejos como: dioles, trioles, glicoles y alcaloaminas (Weeranoppanant et al., 2017: p.4097). Los factores a considerar para la elección del solvente a utilizar en el proceso de extracción, se presentan a continuación:

2.2.2.1. Capacidad de carga

Es la máxima concentración de soluto que puede ser contenida por el solvente antes de que ocurra precipitación. La solubilidad del solvente con respecto al soluto es determinante para su capacidad de carga y la proporción a utilizar del mismo (Perry, 2019, p.1457).

2.2.2.2. Coeficiente de partición o de reparto (K_p)

Representa la solubilidad de una sustancia dentro de un sistema conformado por dos fases inmiscibles entre sí. Es la razón entre las concentraciones de aquella sustancia en ambas fases inmiscibles de la mezcla en estado de equilibrio termodinámico. Se recomienda trabajar con valores de K_p mayores o iguales a 10 para que el proceso sea económico, en base a la utilización de la mínima cantidad de solvente con respecto a la alimentación. Este coeficiente varía con la naturaleza de los constituyentes presentes en el sistema, sus concentraciones y la temperatura (Perry, 2019, p.1457). La ecuación 1 permite obtener el coeficiente de reparto.

$$K_p = \frac{y}{x} \quad (1)$$

Donde:

y: concentración del soluto en el extracto

x: concentración del soluto en el refinado

2.2.2.3. *Selectividad*

La capacidad y efectividad de un disolvente Y para extraer componentes específicos de una mezcla formada por X y Z sustancias; se puede cuantificar mediante la comparación entre la relación de X y Z en la fase rica en Y, con la relación en la fase rica en X en condiciones de equilibrio. Esta comparación se conoce como selectividad o factor de separación β . Si se tiene que A y B son fases en condiciones de equilibrio, entonces:

$$\beta = \frac{(\text{fracción másica de Z en A})/(\text{fracción másica de X en A})}{(\text{fracción másica de Z en B})/(\text{fracción másica de X en B})} \quad (2)$$

Para la extracción, la selectividad del disolvente debe ser mayor a uno, de lo contrario el proceso de extracción es imposible (Treybal, 1998, p.541).

2.2.2.4. *Estabilidad*

El solvente debe ser químicamente estable al momento de ingresar al proceso de extracción, es decir que no debe reaccionar con el soluto ni con los otros componentes de la mezcla de alimentación para no obtener subproductos indeseados, que ocasionan pérdidas y disminución del rendimiento de extracción (Perry, 2019, p.1457).

2.2.2.5. *Diferencia de densidad*

La diferencia de densidad entre el solvente y la mezcla de alimentación debe de situarse entre 0.1 a 0.3 g/ml. Una diferencia muy baja ralentiza el proceso de extracción mientras que una diferencia demasiado elevada dificulta la dispersión de las gotas para la separación de las dos fases finales (Perry, 2019, p.1464).

2.2.2.6. *Viscosidad*

El solvente debe poseer un valor bajo de viscosidad que no supere el valor de viscosidad del agua porque de lo contrario se presenta oposición a la transferencia de masa durante la extracción líquida y la separación de las fases se torna dificultosa. Se recomienda implementar un sistema de calentamiento para obtener valores de viscosidad más bajos y aumentar el rendimiento de la operación (Perry, 2019, p.1464).

2.2.2.7. Tensión interfacial

Mientras mayor sea el valor de la tensión interfacial, mayor es la coalescencia de las emulsiones y mayor es la oposición que presenta un líquido para dispersarse en otro. Los valores recomendados de tensión interfacial entre la mezcla de alimentación y el solvente se sitúan en el rango de 10 a 3 N/m. Para sistemas con valores más elevados de tensión interfacial se requiere de agitación mecánica (Perry 2019, p.1464).

2.2.2.8. Recuperabilidad

El solvente debe poder ser reutilizado para lograr que el proceso sea lo más económico posible. La recuperación se realiza con otras operaciones auxiliares como la destilación. Es necesario que el solvente posea elevada volatilidad para facilitar su recuperación del extracto (Treybal, 1998, p.542).

2.2.2.9. Seguridad

El solvente debe poseer bajo índice de toxicidad e inflamabilidad y su manipulación debe ser segura para reducir el riesgo de daños en la salud humana y en el medio ambiente (Perry, 2019, p.1464).

2.2.3. Métodos gráficos para diseño de equipos de extracción líquido-líquido

2.2.3.1. Equilibrio de fases

En el caso particular de la extracción, las relaciones de equilibrio se tornan mucho más complicadas con respecto a otros métodos de separación de sustancias. En aquellos sistemas conformados por más de una fase líquida, los componentes tienen la tendencia de realizar una repartición desigual al alcanzar el equilibrio; esto puede ser aprovechado para lograr su separación (Galán, 2014, p.190).

2.2.3.2. Diagrama triangular equilátero

El diagrama triangular equilátero presenta una curva semejante a una campana que indica las concentraciones de cada una de las fases cuando han alcanzado el equilibrio. Los puntos localizados en el interior de la curva representan a aquellas mezclas que aparecen en dos fases mientras que los puntos externos a la curva representan a las mezclas que están en una sola fase. La curva posee una división en un punto E denominado punto crítico (gráfico 1-2) en el cual la composición de ambas fases se iguala entre sí. En la zona inferior a este punto, las rectas de reparto permiten unir cada una de las composiciones durante el equilibrio (Galán, 2014, p.191).

En el sistema representado en el gráfico 1-2, donde se muestra el sistema acetona-agua-metilisobutilcetona (MIK), la sustancia a extraer es la acetona que está mezclada con agua como diluyente y el MIK es el solvente que dará lugar al proceso de extracción. La recta ACE contiene los puntos que representan las composiciones correspondientes a la capa de MIK como extracto y la recta BDE contiene las composiciones de la capa de agua como refinado. Se puede observar en la ilustración 2-2 que la fase de extracto es mucho más rica en acetona en comparación con la fase de refinado (McCabe et al., 2007: p.820).

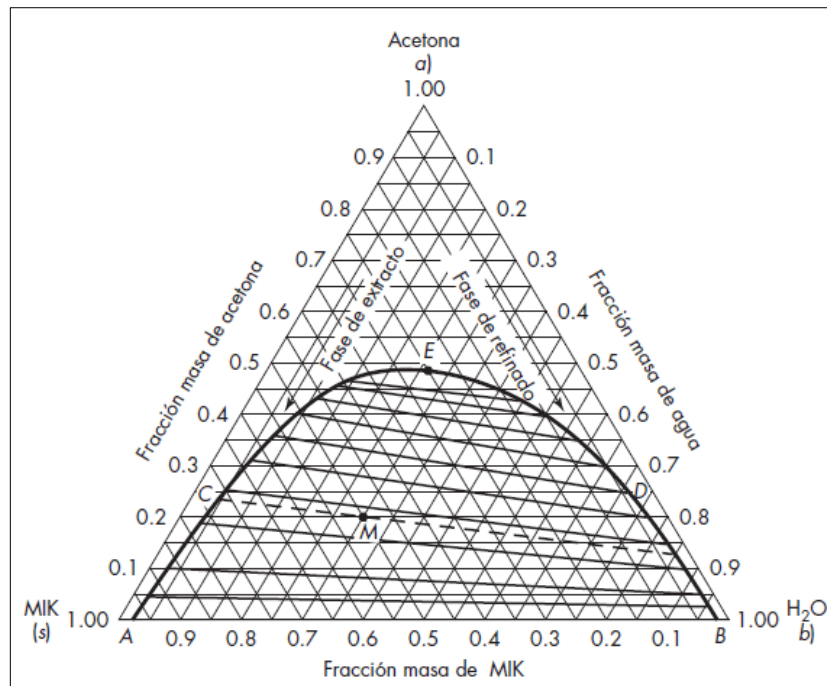


Ilustración 2-2. Diagrama triangular del sistema acetona-MIK-agua.

Fuente: McCabe et al., 2007: p.818.

2.2.3.3. Método de McCabe-Thiele

Existen métodos gráficos para establecer las etapas teóricas de un sistema ternario (compuesto por mezcla de alimentación, soluto objetivo y solvente para extracción). Estos métodos resultan muy valiosos debido a que permiten visualizar la extracción mediante una ilustración que muestra los puntos de pellizco; aquellos donde la operación de transferencia de masa se halla en equilibrio (Perry, 2019, p.1464).

La separación de sustancias en la extracción líquida se realiza en base a un número específico de etapas teóricas en un sistema cascada a contracorriente y se apoya en el uso del diagrama triangular y otras técnicas gráficas como el método *McCabe-Thiele*, el cual proporciona un camino más sencillo. Este método se enfoca en la determinación de la concentración del soluto en las corrientes de salida de extracto y refinado (McCabe et al., 2007: p.820).

Para aplicar el método, los datos obtenidos del equilibrio durante la extracción se colocan en un gráfico rectangular en el que las fracciones másicas del soluto presente en el extracto se ubican en el eje de las ordenadas (Y_A), mientras que las fracciones másicas del soluto en el refinado se ubican en el eje de las abscisas (X_A). En la ilustración 3-2 se presenta el diagrama de McCabe Thiele, en el cual se analiza la extracción de acetona en un sistema de mezcla con agua mediante el uso de metilisobutilcetona como solvente de extracción, se observa que se requieren de cuatro etapas teóricas para el proceso (McCabe et al., 2007: pp.818-821).

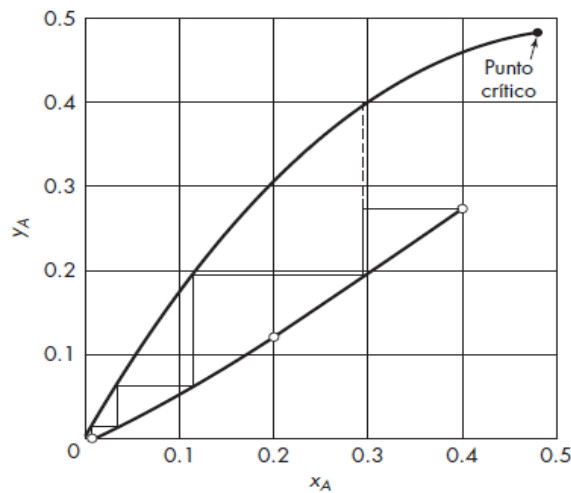


Ilustración 3-2: Diagrama de McCabe Thiele para la extracción de acetona.

Fuente: McCabe et al., 2007: p.821.

2.2.4. Tipos de sistemas de extracción líquida

2.2.4.1. Sistema de tres componentes con un par parcialmente miscible

Es el sistema más empleado para realizar extracciones líquidas. Las líneas que componen las coordenadas triangulares se toman como líneas isotermas. En este tipo de sistema, A y B representan las sustancias que componen la mezcla de alimentación mientras que C es el solvente que permitirá realizar la extracción. Las líneas de reparto generalmente presentan un grado de inclinación con un mismo sentido; esto determina una concentración de soluto con mayor proporción en una de las dos fases existentes. Cuando la línea de reparto es horizontal se tiene solutropía (Galán, 2014, p.195).

Los componentes A y B son miscibles hasta determinado grado para dar paso a la formación de soluciones saturadas y ricas en A (punto L) y ricas en B (punto K). Mientras más grande sea el

nivel de inmiscibilidad de A y B, los puntos L y K se localizarán más próximos a los vértices del triángulo. La curva producida por la unión de los puntos L-R-P-E-K se conoce como curva binoidal de solubilidad, la cual representa cómo afecta la incorporación del solvente C a la solubilidad entre A y B. Cualquier punto ubicado debajo de la curva implica la formación de dos fases insolubles, que son R (rica en A) y E (rica en B) (Treybal, 1998, p.534).

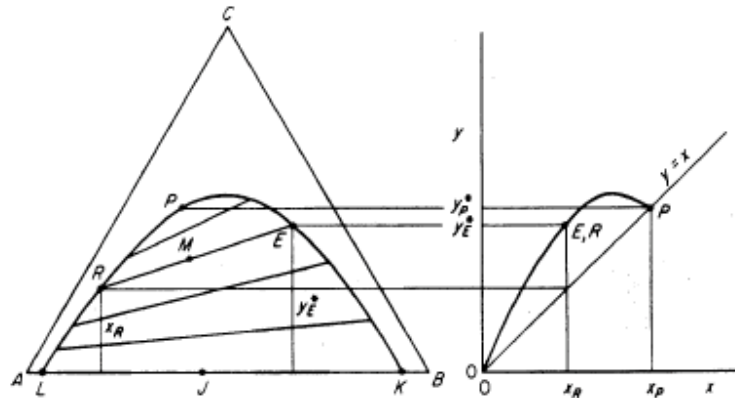


Ilustración 4-2: Sistema ternario con un par miscible.

Fuente: Treybal, 1998, p.535.

2.2.4.2. Sistema de tres componentes con dos pares parcialmente miscibles

Estos son sistemas menos comunes en los procedimientos de extracción líquido-líquido. Se caracterizan por poseer líneas de reparto y curvas de saturación continuas. Los componentes A y C son totalmente miscibles mientras que B presenta solubilidad restringida con A y C respectivamente (ver gráfico 4-2). Las curvas formadas por K-R-H y J-E-L son las denominadas curvas de solubilidad. La primera curva es rica en el componente A y la segunda curva es rica en B. Toda mezcla ubicada por debajo de estas curvas se encuentran en una sola fase. Las mezclas en el punto M se caracterizan por presentar dos fases en E y R (Treybal, 1998, p.536).

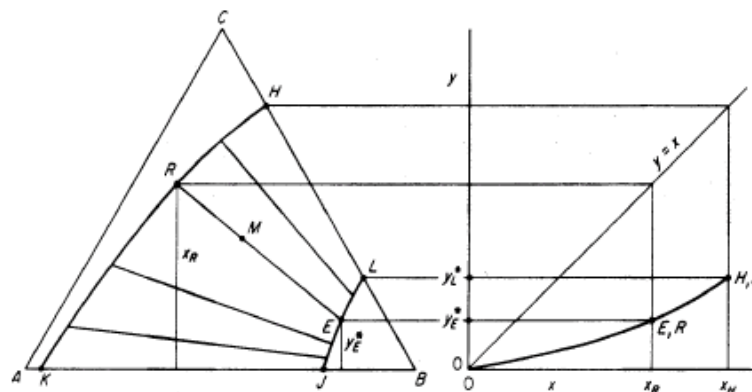


Ilustración 5-2: Sistema ternario con dos pares miscibles.

Fuente: Treybal, 1998, p.537.

2.2.5. Variables que influyen en la extracción líquido-líquido

2.2.5.1. Efecto de la presión

El efecto de la presión puede ser despreciado en este tipo de sistemas porque es muy pequeño. Se debe considerar que la gráfica del sistema se ha realizado con presiones que sobrepasen los valores de las presiones de vapor de las distintas soluciones de lo contrario, no se puede llegar al equilibrio en fase líquida (Treybal, 1998, p.536).

2.2.5.2. Efecto de la temperatura

La temperatura influye directamente en la solubilidad de los componentes de una mezcla. A medida que se incrementa la temperatura, es posible alcanzar un punto en el que se obtiene una sola fase líquida y se puede tener modificación en la inclinación de las líneas de reparto. Esto se representa en diagramas tridimensionales como se muestra en la ilustración 6-2 (Galán, 2014, pp. 195-196).

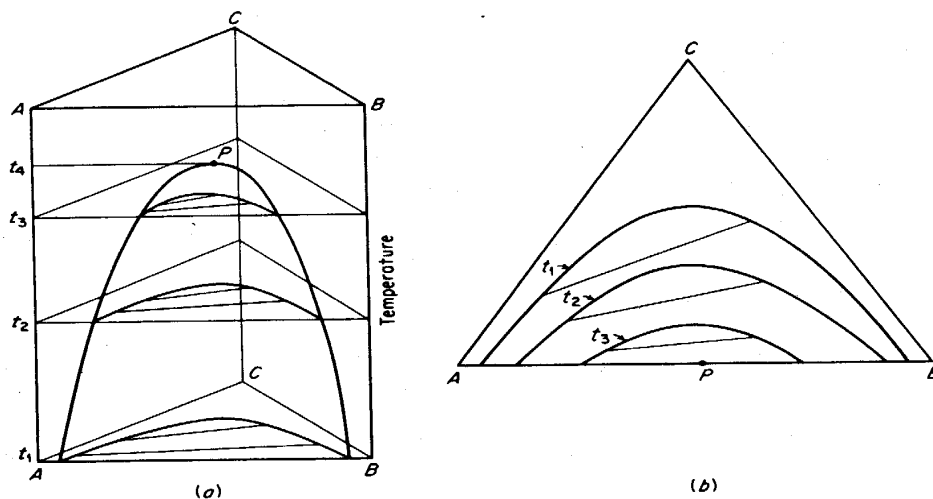


Ilustración 6-2: Efecto de la temperatura sobre un sistema ternario

Fuente: Treybal, 1998, p.538.

2.2.6. Tipos de extracción líquida

2.2.6.1. Extracción en una sola etapa

En la ilustración 7-2 se representa un sistema de extracción en una sola etapa, donde A es la mezcla de alimentación que contiene el soluto a extraer, S es el solvente para extracción, R es el refinado y E es el extracto. La corriente de alimentación A puede ser por lotes o continua. Se tiene únicamente dos corrientes de salida.

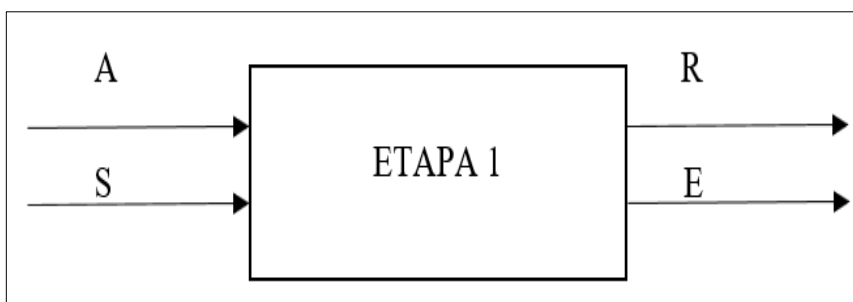


Ilustración 7-2: Sistema de extracción en una sola etapa.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

2.2.6.2. Extracción por etapas múltiples en contracorriente

En estos sistemas, la corriente de alimentación ingresa en sentido opuesto al sentido de entrada de la corriente del solvente. El refinado que sale de la primera etapa se convierte en la corriente de alimentación para la segunda etapa y así consecutivamente hasta completar n cantidad de etapas como se esquematiza en la ilustración 8-2. El extracto que sale de la última etapa, se convierte en corriente de entrada para la etapa anterior, realizando una alimentación regresiva hasta llegar a la primera etapa. Igual que en el sistema anterior, se tiene dos corrientes de entrada y dos corrientes de salida.

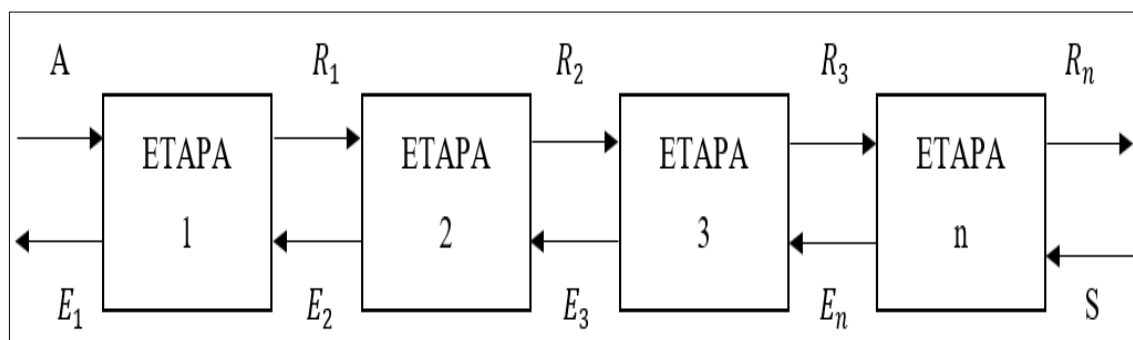


Ilustración 8-2: Sistema de extracción en varias etapas a contracorriente.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

2.2.6.3. Extracción en etapas múltiples por corriente cruzada

Este sistema es una extensión de la extracción en una sola etapa. Se caracteriza por permitir el contacto continuo del refinado con solvente fresco para obtener una sola corriente de refinado luego de las n etapas de extracción líquida. El refinado de la primera etapa se convierte en la alimentación de la nueva etapa y así sucesivamente. Se tienen n corrientes de salida de los extractos por cada una de las etapas de extracción como se muestra en la ilustración 9-2.

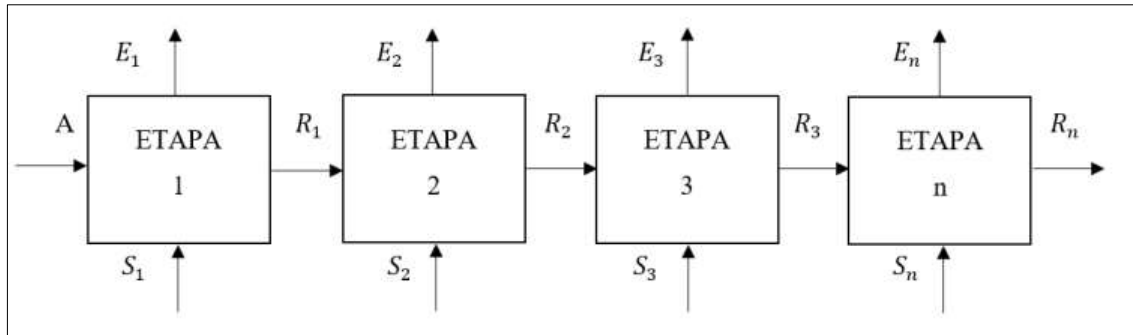


Ilustración 9-2: Sistema de extracción en varias etapas por corriente cruzada.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

2.2.7. Equipos de extracción y principio de funcionamiento

El adecuado contacto entre las dos fases que ingresan a una columna de extracción es fundamental para conseguir la transferencia de masa deseada y su posterior separación. Las dos fases que se forman dentro de un equipo de extracción tienen diferente densidad lo cual posibilita su separación. Los extractores líquido-líquido pueden operar de forma continua o a través de cargas. El flujo continuo con etapas de contacto es el más recomendable cuando se opera con cantidades grandes. Las salidas del extracto y refinado dependen de la densidad de cada uno; el más ligero sale por la parte superior del equipo mientras que el más pesado por la parte inferior (McCabe et al., 2007: p.809). En la tabla 1-2 se describen las características de los equipos de extracción líquida más utilizados a nivel industrial.

Tabla 1-2: Características del funcionamiento de equipos comerciales para extracción

Tipo	Capacidad de líquido de las corrientes combinadas, $\frac{ft^3}{ft^2 \cdot h}$	HTU, ft	Eficiencia del plato o de la etapa, %	Espaciado entre platos o etapas, in	Aplicaciones típicas
Mezclador-sedimentador			75-100		Proceso para aceites lubricantes
Columna empacada	20-150	5-20			Recuperación de fenol
Columna de platos perforados	10-200	1-20	6-24	30-70	Proceso para aceite lubricante

Tabla 1-2: Características del funcionamiento de equipos comerciales para extracción

Tipo	Capacidad de líquido de las corrientes combinadas, $\frac{ft^3}{ft^2 \cdot h}$	HTU, ft	Eficiencia del plato o de la etapa, %	Espaciado entre platos o etapas, in	Aplicaciones típicas
Columna de placas deflectoras	60-105	4-6	5-10	4-6	Recuperación de ácido acético
Torre agitada	50-100	1-2	80-100	12-24	Químicos farmacéuticos y orgánicos

Fuente: McCabe et al., 2007: p.810.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

La elección de un equipo de extracción está sujeto a diferentes factores como: el tiempo de residencia requerido, cantidad de etapas teóricas, producción requerida, disponibilidad de materiales para la construcción, viscosidades de los componentes del sistema de extracción, limitaciones en cuanto a altura, capital de inversión y objetivo del proceso de extracción. Los equipos de extracción pueden ser clasificados en dos grupos generales: los estáticos y los que requieren de agitación mecánica (Perry, 2019, p.1470).

El extractor con agitación mecánica facilita el contacto entre la mezcla y el solvente, agiliza el proceso de extracción y ayuda a trabajar con una amplia gama de caudales. Otros aspectos a tomar en cuenta para la elección de un equipo de extracción son: capacidad de operación con sustancias corrosivas, inflamables o tóxicas; facilidad en el mantenimiento y limpieza; cumplimiento de los requisitos del proceso seleccionado con la mayor eficiencia posible (Perry, 2019, p.1485).

2.2.8. Tipos de equipos de extracción líquida

El mezclado de las corrientes de entrada dentro de un equipo de extracción puede ser realizado de diversas formas por lo que existen diferentes modelos que se describen a continuación.

2.2.8.1. Mezcladores-agitadores

Se caracterizan por estar diseñados con sucesivas etapas para contacto. El refinado que se obtiene en cada etapa de alimentación se convierte en la alimentación para el posterior mezclador. Las

etapas se caracterizan por estar a contracorriente como se puede visualizar en el la ilustración 10-2 (McCabe et al., 2007: p.810).

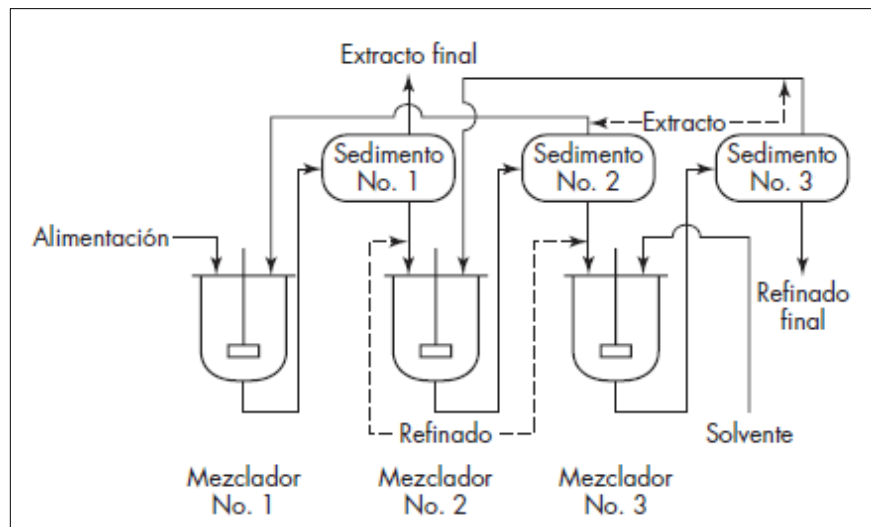


Ilustración 10-2: Equipo de extracción mezclador-sedimentador.

Fuente: McCabe, et al., 2007: p.811.

2.2.8.2. Columna con rellenos

En este tipo de extractores, el contacto no se realiza por etapas sino de forma diferencial como se puede observar en la ilustración 11-2. En estas columnas, la transferencia de materia se da de forma continua y entre las fases, cuya composición se modifica simultáneamente con la velocidad de inundación de la columna (McCabe et al., 2007: p.811).

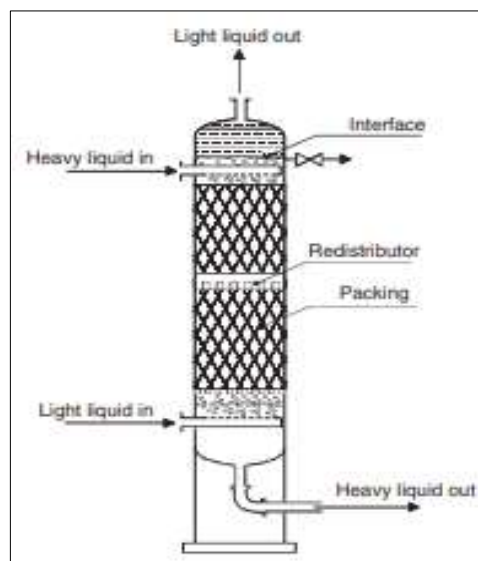


Ilustración 11-2: Columna de extracción con rellenos.

Fuente: Perry, 2019, p.1489.

Los rellenos se emplean para: generar un camino tortuoso para las gotas dispersas de mezcla y solvente, reducir la mezcla axial, favorecer la transferencia de masa y aumentar el rendimiento de la operación. Los rellenos utilizados en las columnas de extracción son similares a los utilizados en las torres de destilación y absorción. La elección del material del relleno es fundamental en el diseño de los equipos ya que puede ser: metálico, plástico o cerámico y su disposición puede ser aleatoria o estructurada. Los rellenos deben resistir la posible acción corrosiva de las sustancias con las cuales se va a trabajar (Perry, 2019, p.1480).

2.2.8.3. Columna con platos perforados

Este equipo está formado por platos que tienen perforaciones que permiten el paso de la mezcla líquida y solvente en el proceso de extracción (ilustración 12-2), el cual se realiza en el área de mezcla ubicado sobre las perforaciones de los platos. Esta columna es utilizada para la extracción de aceites a nivel industrial y se caracterizan por operar con elevadas velocidades de extracción, debido a que las gotas obtenidas por dispersión del líquido vuelven a unirse en cada etapa. Uno de los problemas que presenta este diseño es la acumulación de impurezas sobre los platos (McCabe et al., 2007: p.812).

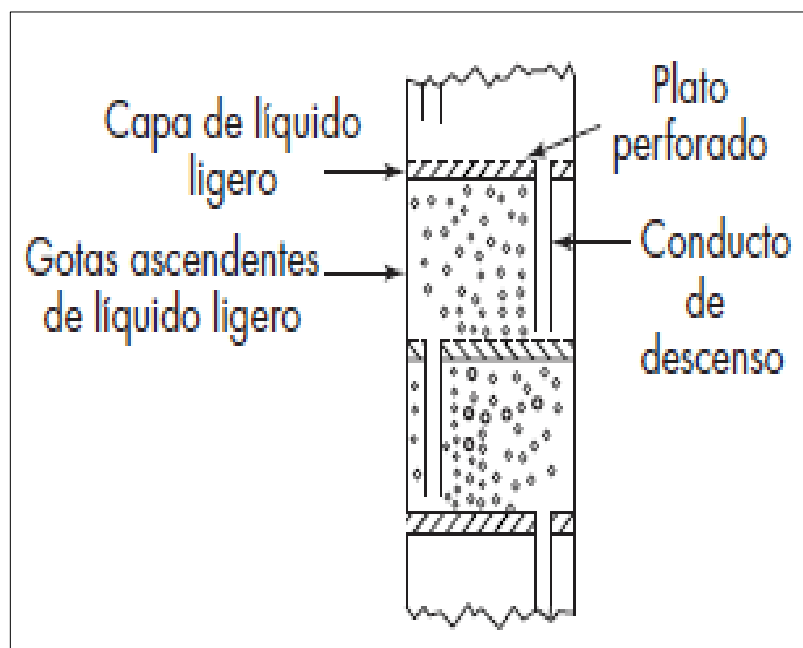


Ilustración 12-2: Columna de extracción con platos perforados.

Fuente: McCabe et al., 2007: p.812.

2.2.8.4. Columna con placas deflectoras

Es una torre constituida por un conjunto de placas deflectoras en disposición horizontal. La alimentación líquida pasa a través de cada una de las placas con un flujo suave y realiza una caída

semejante a la de una cascada. Estas placas no poseen perforaciones. Se emplean para el tratamiento de soluciones contaminadas con partículas suspendidas que se sedimentan sobre cada placa y son adecuadas para trabajar con líquidos de rápida emulsificación (McCabe, et al., 2007: p.813).

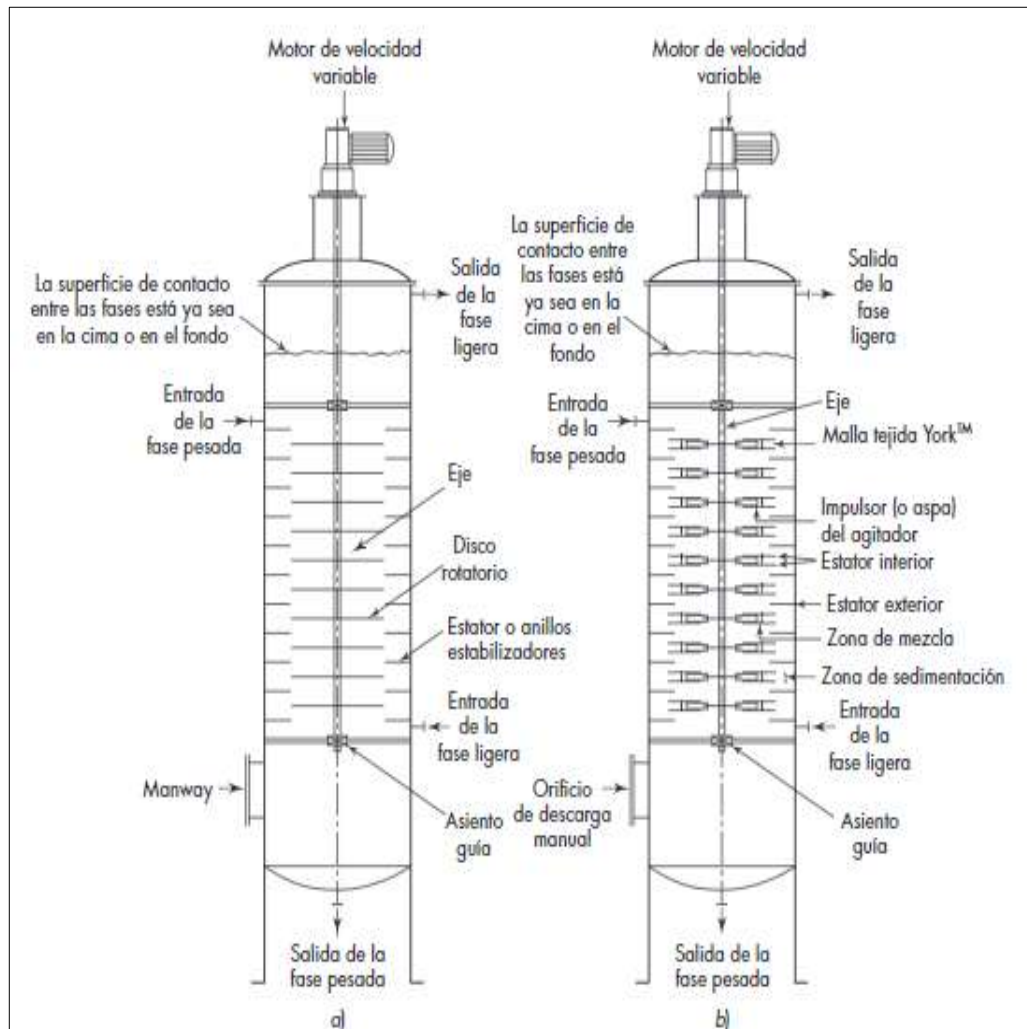


Ilustración 13-2: a) Columna con platos perforados, b) Columna *Scheibel*.

Fuente: McCabe et al., 2007: p.813.

2.2.8.5. Columna de aspersión

Este modelo de columna es el más simple y el de mayor antigüedad en el uso a nivel industrial. El funcionamiento consiste en el contacto de dos fases líquidas realizado a contracorriente (ilustración 14-2). Un distribuidor permite la dispersión de gotas en la fase continua. Según sea el diseño de la columna, se pueden ubicar varios dispersores a lo largo de la torre. Este tipo de columna es económica y opera de forma sencilla, sin embargo, su rendimiento es bajo en comparación con otros tipos de columnas de extracción debido a efectos de retromezclado extracción (Galán 2014, p.202).

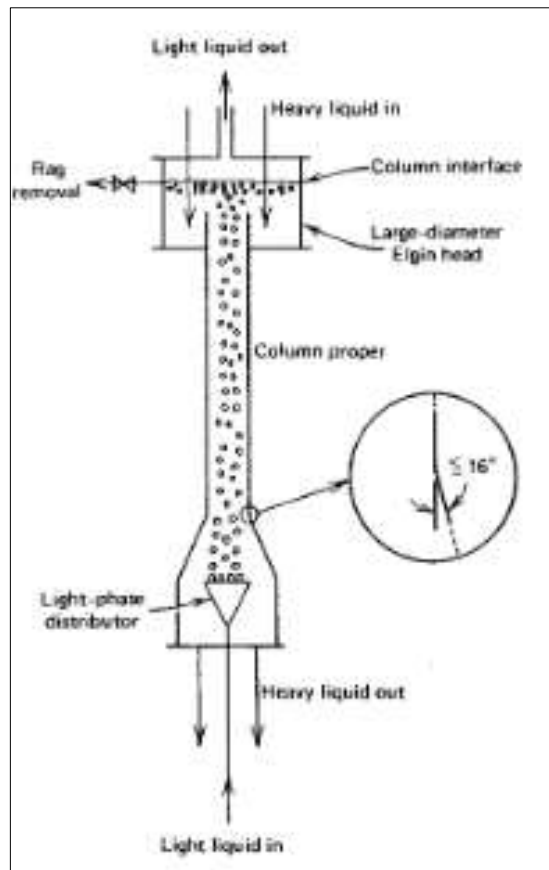


Ilustración 14-2: Columna de aspersión o spray.

Fuente: Galán, 2014, p.202.

2.2.8.6 Extractor con agitación mecánica

Los equipos analizados anteriormente exceptuando los mezcladores-sedimentadores, no requieren de fuerza mecánica en el proceso de mezclado para conseguir la separación de la sustancia objetivo. Existen columnas de extracción en las cuales el diseño incluye agitadores incorporados en un eje central rotatorio. Como se puede observar en la ilustración 13-2, se tiene un conjunto de aspas que permiten crear sistemas similares al de los mezcladores-sedimentadores en los espacios comprendidos entre dos aspas. Las zonas que se encuentran alrededor de las aspas se caracterizan por la presencia de rellenos metálicos que se utilizan en este diseño para ayudar a la separación de las dos fases (McCabe et al., 2007: p.814).

2.2.8.7. Columna Scheibel

Es un tipo de columna con sistema de agitación mecánica y distribución de rellenos. La columna tiene un eje rotatorio con aspas incorporadas, que realizan la agitación de la mezcla con el solvente y rellenos con disposición empacada, que promueven una mayor transferencia de masa en comparación con otros diseños de columnas de extracción, al aumentar la superficie de contacto

del solvente con la mezcla alimentada. Este diseño se representa en la ilustración 15-2. Este equipo requiere de poco espacio de trabajo, su consumo de energía y la cantidad de solvente a utilizar es reducida, en comparación con otros equipos de extracción (Asadollahzadeh et al., 2021: p.2).

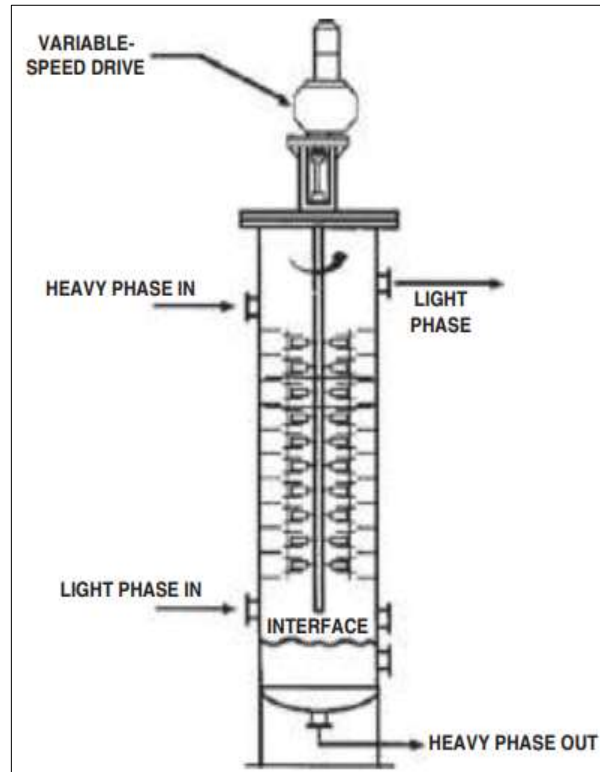


Ilustración 15-2: Columna de extracción Scheibel.

Fuente: Perry, 2019, p:1488.

La agitación es un factor clave para el aumento de los valores de coeficientes de transferencia de masa y tiene un efecto significativo en el proceso de inundación dentro de la columna. Este tipo de columna ofrece la mayor capacidad de extracción ya que el eje rotatorio ayuda a obtener un mayor nivel de rotura de las gotas y así reducir el nivel de coalescencia que posee la mezcla de alimentación (Asadollahzadeh et al., 2017: p.2).

La columna *Scheibel* es idónea para trabajar con mezclas que poseen elevada tensión interfacial. No es recomendable para mezclas con elevada tendencia a la emulsificación debido al alto cizallamiento proporcionado por el sistema de agitación rotatoria. Se considera al extractor *Scheibel* como uno de los extractores con mayor nivel de eficiencia y con gama amplia de aplicaciones a nivel industrial, especialmente en lugares donde se requiere la optimización del espacio que ocupa el equipo. Los empaques al estar formados por mallas que poseen áreas libres, permiten tener mayor volumen disponible para el proceso de extracción, mientras que la agitación contribuye con una mayor eficiencia durante el proceso (Perry, 2019, p.1488).

2.2.8.8. Columna Karr

En estas columnas, la agitación se realiza por medio de un sistema de pulsación gracias al cual la mezcla líquida realiza movimiento vertical hacia arriba y abajo alternativamente (ilustración 16-2). El diseño incluye un eje central que tiene platos oscilantes, que se caracterizan por tener áreas abiertas para que el líquido circule libremente entre los platos. La presencia de platos favorece la obtención y distribución de tamaños de gota mucho más uniformes debido al corte realizado por las aberturas de los discos. Esta columna es útil para sistemas con tensión interfacial moderada (Perry, 2019, p.1490).

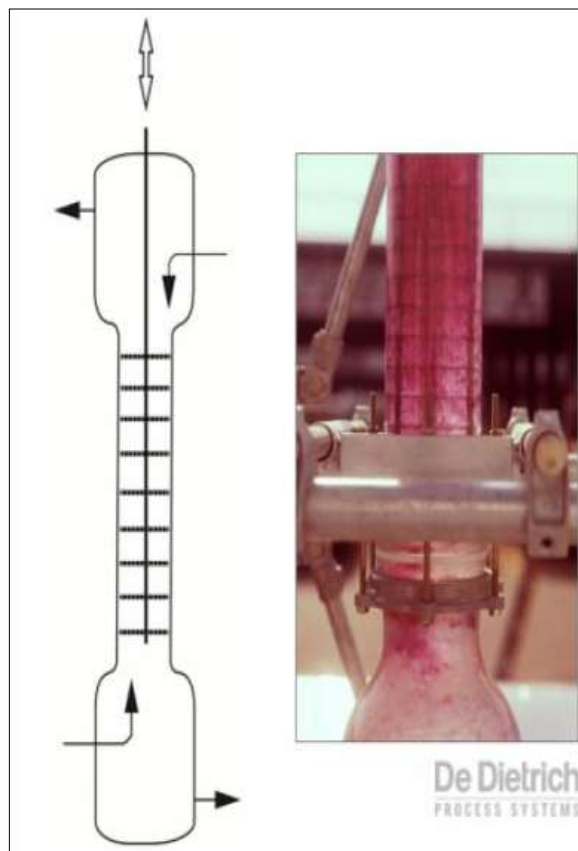


Ilustración 16-2: Columna de extracción *Karr*.

Fuente: De Dietrich Systems, 2022, p.7.

2.2.8.9. Columna Kuhni

Es similar a la columna *Schiebel* porque emplea agitación mecánica mediante un eje central. La diferencia radica en la existencia de platos perforados que permiten diferenciar las etapas del proceso de extracción y minimizar los efectos del retromezclado entre las etapas (Perry, 2019, p.1425). En este tipo de columna de extracción, la interfaz necesaria para la transferencia de masa se logra con turbinas colocadas una encima de los otros compartimentos como se representa en la ilustración 17-2.

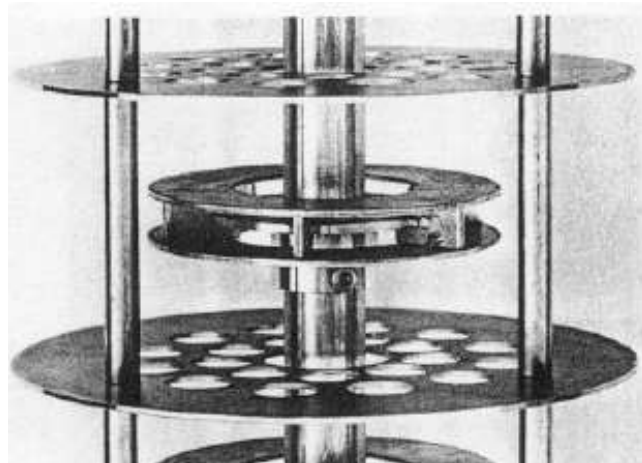


Ilustración 17-2: Platos de la columna *Kuhni*.

Fuente: Galán, 2014, p.207.

2.2.8.10. Columna de extracción con plataforma giratoria (RDC)

La columna está diseñada con placas en disposición horizontal entre las que se encuentran discos circulares unidos por un eje central (Ilustración 18-2). También dispone de anillos conocidos como estatores, localizados en el centro exacto comprendido en el espacio entre discos. La velocidad de giro de los discos es determinante en el proceso de extracción (Dietrich Systems, 2022, p.7).

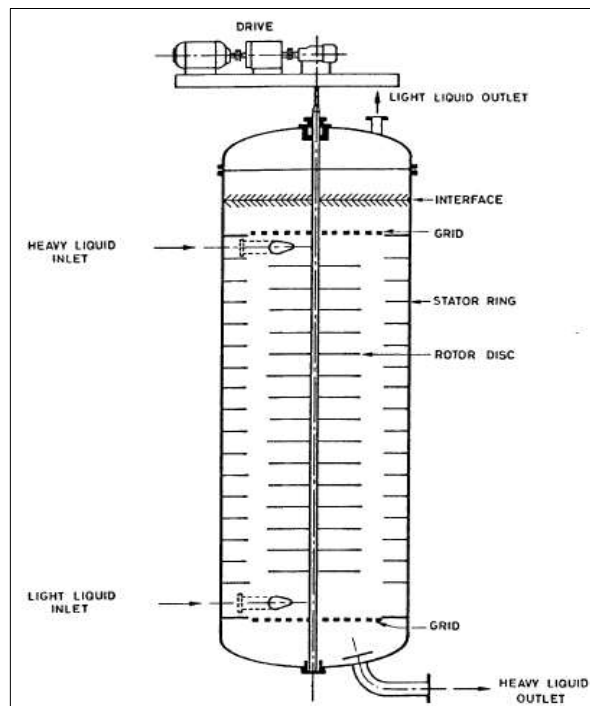


Ilustración 18-2: Columna de extracción *Kuhni*.

Fuente: Galán, 2014, p.208.

2.2.8.11 Columnas de pulsos

La fuerza mecánica en una columna de extracción también puede ser aportada de manera externa como se da en el caso particular de las columnas de pulsos. Se emplea una bomba para ejercer pulsaciones en el volumen total de la columna de extracción. La columna puede tener rellenos o platos con perforaciones de menor diámetro en comparación con los platos de las torres no pulsadas. Estos equipos son utilizados para el tratamiento de líquidos muy corrosivos y radioactivos (Perry, 2019, p.1493).

La ventaja de estas torres es que la altura requerida es generalmente menor a un tercio de la altura total de una columna no pulsada. En este diseño, la pulsación ejercida por la bomba ayuda al contacto entre la fase ligera y la fase pesada que ingresan a contracorriente, como se representa en la ilustración 19-2. Estas columnas de pulsos pueden ser de rellenos o de platos perforados (McCabe et al., 2007: p.814).

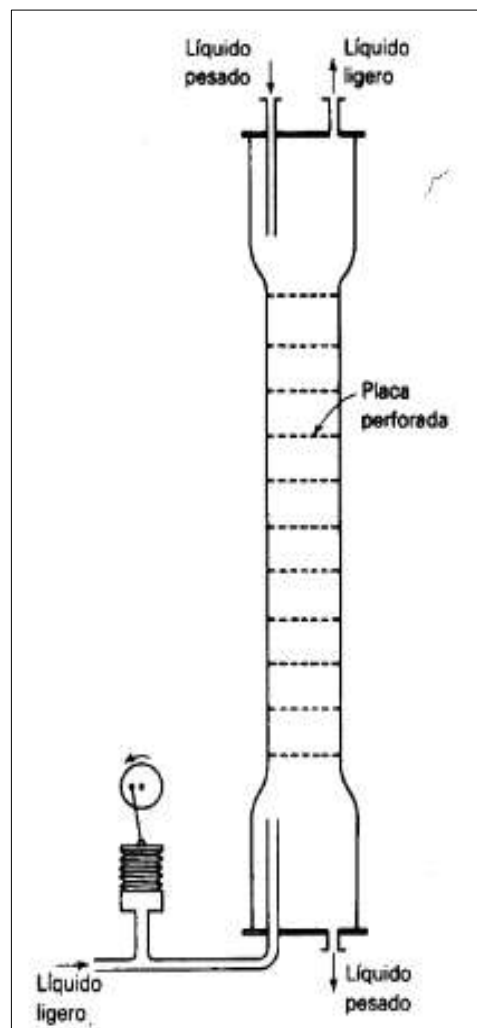


Ilustración 19-2: Columna de pulsos.

Fuente: Treybal, 1998, p.606.

2.3.8.12. Extractores centrífugos

Una alternativa al diseño convencional de los equipos para extracción líquido-líquido es el extractor *Podbielniak*, donde la fuerza centrífuga es la promotora de la separación de las sustancias. El diseño se basa en la incorporación de una banda con perforaciones localizada dentro de una carcasa de metal que está enrollada alrededor de un eje horizontal hueco (ilustración 20-2) que permite la salida y entrada de sustancias líquidas que fluyen en sentidos opuestos (Galán, 2014, p.208).

Entre las ventajas de este equipo se tiene: la rápida transferencia de masa, equivalente a 20 contactos teóricos, el tiempo de residencia para la extracción es mínimo y la cantidad de disolvente utilizada es menor en comparación con otros equipos, sin embargo, su costo es elevado y sus aplicaciones son limitadas a la extracción de sustancias altamente sensibles como los antibióticos y las vitaminas (McCabe et al., 2007: p.815).

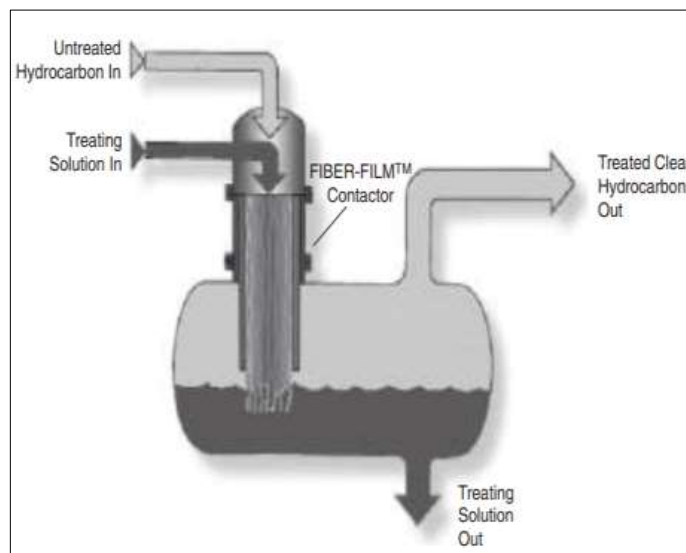


Ilustración 20-2: Extractor centrífugo.

Fuente: Perry, 2019, p.1494.

2.3.9. Normativas empleadas para el diseño de equipos de extracción

2.3.9.1. Código ASME

Es un conjunto de normativas internacionales establecido por la Asociación Estadounidense de Ingenieros Mecánicos y son de vital importancia en los campos de ingeniería entre los cuales destacan la generación de electricidad y la industria de la petroquímica. Este código es considerado como el más avanzado para cumplir con los requerimientos de la seguridad industrial y es aplicado a nivel mundial (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos, 2022, p.5).

2.3.9.2. Norma ASME B31.3

Esta norma presenta en detalle los requerimientos de materiales para el diseño, construcción e instalación de tuberías utilizadas para el transporte de fluidos tales como sustancias químicas, derivadas del petróleo, gases, vapores, refrigerantes y aire. Esta es la norma más empleada para la implementación de tuberías dentro de plantas químicas, farmacéuticas y petroquímicas (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos, 2022, p.9).

2.3.9.3. Norma ASTM

Es una reglamentación desarrollada por la *American Society for Testing and Materials* y permite regular la calidad del acero empleado para construcciones y diseños de estructuras. Esta norma asegura que las propiedades mecánicas y la soldabilidad de los aceros sean las más adecuadas para su uso a nivel industrial (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales, 2022, p.2).

2.3.9.4. Norma AISI

Es una norma establecida por el Instituto Americano de Hierro y Acero (*American Iron and Steel Institute* por sus siglas en inglés), que clasifica a los aceros inoxidables empelados a nivel industrial en función de su composición, mediante una codificación establecida por 4 dígitos y una o más letras. El primer dígito indica el tipo de acero, el segundo es el elemento con el que se realiza la aleación y el último, muestra la proporción de carbono presente en el metal. Esta normativa permite establecer características como ductilidad, templabilidad y dureza de los aceros estructurales (American Iron and Steel Institute, 2022, p.4).

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Caracterización del sistema ternario

La utilidad de la extracción líquido-líquido como técnica de separación depende de los equilibrios de fase y las propiedades de transporte. Las variables más importantes dentro de este proceso son: la tensión interfacial, densidad del líquido y la viscosidad. Estas características influyen en la difusión de solutos y también son factores críticos que afectan el rendimiento de los extractores líquido-líquido (Perry, 2019, p.1387).

3.1.1. Densidad

La diferencia de densidades entre las dos fases líquidas del sistema conformado por mezcla de alimentación y soluto tiene que ser suficiente para permitir que exista una buena velocidad de flujo a contracorriente, así como una adecuada coalescencia. Cuanto mayor sea la diferencia de densidades, mejores resultados se obtendrán en la extracción.

Tabla 1-3: Densidades de las sustancias del proceso de extracción

Sustancia	Densidad (Kg/m^3) a 20 °C
Agua	1000
Gasolina	720
Etanol	790

Fuente: Perry, 2019, p.1387.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

3.1.2. Viscosidad

Los valores de este parámetro deberán ser bajos para facilitar el transporte de las sustancias y su almacenamiento.

Tabla 2-3: Viscosidades de las sustancias del proceso de extracción

Sustancia	Viscosidad (Poise) a 20 °C
Agua	0,010
Gasolina	0,006
Etanol	0,012

Fuente: Perry, 2019, p.1387.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

3.1.3. Tensión interfacial

La tensión interfacial alta del sistema elegido (agua-etanol-gasolina) ocasiona una coalescencia rápida y requiere de un sistema de agitación mecánica para producir pequeñas gotas y favorecer la transferencia de masa (Lobato, 2016, p.42).

3.2. Condiciones de operación

3.2.1. Presión

La presión se considera constante para todas las etapas de la columna, ya que solo existen variaciones en la parte superior; lo cual no afecta de manera significativa al equilibrio líquido-líquido. Esta presión es de 0,72 atm (presión atmosférica de Riobamba).

3.2.2. Temperatura

Al igual que la presión, la temperatura se mantiene constante para todas las etapas de la columna ya que la alimentación y el solvente para extracción ingresan a 20 °C. El proceso es adiabático porque no hay transferencia de calor y solo existe transferencia de materia. Las corrientes de salida tienen la misma temperatura que las corrientes de entrada.

3.3. Diseño de la columna de extracción

En el presente trabajo se diseñó una columna de extracción líquido-líquido a escala de laboratorio, para la separación de una mezcla gasolina-etanol y recuperación de este último mediante el uso del solvente agua. La finalidad de esta columna es obtener un extracto rico en etanol, por lo que se diseña una torre capaz de producir dos corrientes de salida: una de extracto y otra de refinado con una concentración baja de etanol.

3.4. Normativa para la construcción del equipo

Los códigos y normativas que fundamentaron el diseño del equipo fueron: ASME, ASTM y AISI; los cuáles brindaron los fundamentos técnicos para la selección de materiales y tuberías.

3.5. Selección de materiales de construcción

3.5.1. Vidrio borosilicato 3.3

Este tipo de vidrio es un material ampliamente utilizado en plantas piloto y de procesos; se utiliza en la industria química y farmacéutica, así como también en empresas cerveceras e industrias metalúrgicas, debido a que ayuda a visualizar y controlar procesos. Además, es resistente a la corrosión, ácidos fuertes y cambios de temperatura. Estas características permitieron seleccionar al vidrio borosilicato 3.3 como material para la columna de extracción.

Tabla 3-3: Características del Borosilicato 3.3

Característica	Especificación
Composición	SiO ₂ 80.6% B ₂ O ₃ 12.5% NaO 4.2% Al ₂ O ₃ 2.2% otros elementos 0.5%
Densidad a 20 °C (ρ)	2,230 Kg/m ³
Resistencia para fuerzas de tensión y doblamiento (K/S)	7 N/mm ²
Parámetro de resistencia para la fuerza de compresión (K/S)	100 N/mm ²
Temperatura permitida de operación	-50/+200 °C

Fuente: Carbone Stainless Steel, 2022, p.3.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

3.5.2. Acero inoxidable AISI 304

Debido a su buena resistencia a la corrosión, conformado en frío y soldabilidad, este acero es usado para: arquitectura, industria automotriz y la fabricación de utensilios domésticos. Además, es utilizado en la construcción de estructuras y contenedores para las industrias procesadoras de alimentos y para la industria química de producción de nitrógeno. Debido a estas excelentes propiedades mecánicas, el acero inoxidable AISI 304 fue el material seleccionado para la construcción de tuberías, accesorios y recipientes de alimentación.

Tabla 4-3: Características del acero inoxidable AISI 304

Característica	Especificación
Composición	C \leq 0.08%* Si \leq 1.00% Mn \leq 2.00% Cr 18% - 20%* Ni 8% - 10,5%
Densidad a 20 °C (ρ)	7,9 Kg/m ³
Módulo de elasticidad (E)	193 N/mm ²
Resistividad eléctrica	0.73 $\mu\Omega$ m
Resistencia a la tracción	520-720 N/mm ²
Soldabilidad	Muy buena

Fuente: Carbone Stainless Steel, 2022, p.5.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

3.5.3. Malla plástica de polietileno

Este material se caracteriza por su elevada resistencia a la corrosión y a agentes químicos, buena resistencia a la tracción, la abrasión y el desgaste. Su ligereza, inocuidad, estabilidad química y flexibilidad permitieron elegir este material como el más adecuado para los rellenos de la columna de extracción.

Tabla 5-3: Características de las mallas de polietileno

Característica	Especificación
Composición	(C ₂ H ₄) _n
Densidad	baja
Color	negro
Tamaño de malla	6 mm x 4mm
Resistencia química	alta
Resistencia a la corrosión	alta
Resistencia a la tracción	alta

Fuente: ACESCO, 2022, p.2.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

3.5.4. Acero estructural ASTM A36

El acero al carbono estructural conocido como hierro negro, es empleado como material estructural para puentes y edificaciones remachadas, atornilladas o soldadas. Debido a su amplio uso en la fabricación de estructuras de acero soldadas y atornilladas para la construcción industrial y civil se estableció el acero ASTM A36 como material de la estructura de soporte de la columna.

Tabla 6-3: Características del acero estructural ASTM 036

Característica	Composición
Composición	0.25 – 0.29 % C 0.60 – 1.20 % Mn 0.15 – 0.40 % Si 0.04 % P máx 0.05 % S máx
Densidad a 20 °C (ρ)	7,85 Kg/m ³
Módulo de elasticidad E	200 N/mm ²
Punto de fusión	1538 °C
Límite de fluencia	250-280 Mpa
Resistencia a la tensión	400-550 Mpa
Soldabilidad	Muy buena

Fuente: ACESCO, 2022, p.3.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

3.6. Ingeniería del proyecto

3.6.1. Cálculos para el dimensionamiento de la columna de extracción

3.6.1.2. Alimentación de la columna

Se consideró una alimentación de 40 kg/h, corriente que contiene 50% en peso de etanol en gasolina que se va a extraer con 80 kg/h de agua. Ambas corrientes ingresaron a la columna a una temperatura de 20 °C y 0,72 atm de presión. Los datos de equilibrio se tomaron de la tesis de investigación “Determinación de la solubilidad de Etanol Anhidro y Etanol Acuoso en gasolina sintética y refinada y la tolerancia de agua a 298,15 K, 308,15 K, 318,15 K.” realizada por Trujillo (2012, p.47).

Tabla 7-3: Datos equilibrio del sistema agua-gasolina-etanol

Fase inferior (rica en agua)			Fase superior (rica en gasolina)		
Agua (w_1)	Gasolina sintética (w_2)	Etanol anhidro (w_3)	Agua (w_1)	Gasolina sintética (w_2)	Etanol anhidro (w_3)
0,8515	0,0040	0,1445	0,0017	0,9907	0,0077
0,6427	0,0063	0,3510	0,0017	0,9862	0,0320
0,4421	0,0094	0,5485	0,0023	0,9506	0,0471
0,4046	0,0100	0,5854	0,0026	0,9328	0,0646
0,2371	0,0462	0,7168	0,0028	0,9172	0,0800
0,1613	0,1358	0,7028	0,0029	0,9095	0,0876
0,1556	0,1426	0,7018	0,0043	0,8732	0,1225

Fuente: Trujillo, 2012, p.47.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

3.6.1.3. Determinación del número de etapas teóricas y reales

A partir de los datos de equilibrio presentados en la tabla 7-3 y mediante el uso del programa *ProSimTernaryDiagram* se obtuvieron las etapas teóricas por el método de Hunter Nash.

Tabla 8-3: Líneas de reparto extracto en *ProSimTernaryDiagram*

Línea de fase rica en agua		
A	B	C
0,8515	0,0040	0,1445
0,6427	0,0063	0,3510
0,4421	0,0094	0,5485
0,4046	0,0100	0,5854
0,2371	0,0462	0,7168
0,1613	0,1358	0,7028
0,1556	0,1426	0,7018

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

Tabla 9-3: Líneas de reparto refinado en *ProSimTernaryDiagram*

Línea de fase rica en gasolina		
A	B	C
0,0017	0,9907	0,0077
0,0017	0,9862	0,0320
0,0023	0,9506	0,0471
0,0026	0,9328	0,0646
0,0028	0,9172	0,0800
0,0029	0,9095	0,0876
0,0043	0,8732	0,1225

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

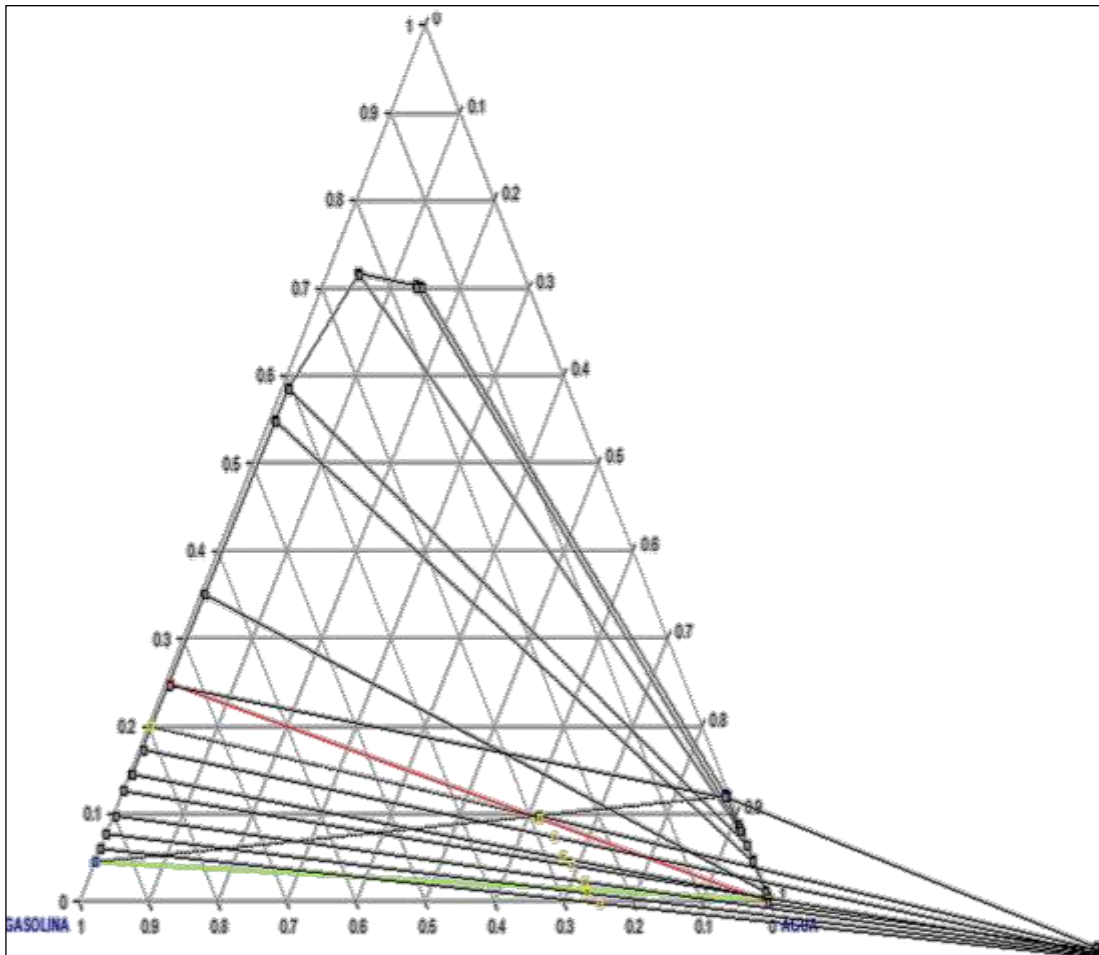


Ilustración 1-3: Número de etapas del diagrama de equilibrio en *ProSimTernaryDiagram*.

Fuente: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

Las etapas teóricas obtenidas mediante el diagrama de equilibrio son las siguientes:

$$\#_{ETAPAS\ TEÓRICAS} = 7$$

Algunos otros aspectos en cuanto al diseño fueron tomados de la información proporcionada por McCabe et al., (2007: p.810) los cuales dependen del tipo de columna de extracción.

Tabla 10-3: Características del funcionamiento de equipos comerciales para extracción

Tipo	Capacidad de líquido de las corrientes combinadas, $\frac{ft^3}{ft^2 \cdot h}$	HTU, ft	Eficiencia del plato o de la etapa, %	Espaciado entre platos o etapas, in	Aplicaciones típicas
Mezclador-sedimentador			75-100		Proceso para aceites lubricantes
Columna empacada	20-150	5-20			Recuperación de fenol
Columna de platos perforados	10-200	1-20	6-24	30-70	Proceso furfural para aceite lubricante
Columna de placas deflectoras	60-105	4-6	5-10	4-6	Recuperación de ácido acético
Torre agitada	50-100	1-2	80-100	12-24	Químicos farmacéuticos y orgánicos

Fuente: McCabe et al., 2007, p.810.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

El valor de la altura de unidad de transferencia (HTU) se determinó en base a la tabla 10-3, la cual va desde 1 a 2 pies y la eficiencia por etapas desde un 80-100%. Al tratarse de un equipo a escala de laboratorio, se toman los valores menores de estos dos parámetros.

$$\varepsilon(\%) = 80\%$$

$$HTU = 1ft \approx 30\text{ cm}$$

La relación entre etapas teóricas y reales se desarrolló mediante la siguiente ecuación:

$$\varepsilon(\%) = \frac{\# \text{ etapas teóricas}}{\# \text{ etapas reales}} \quad (3)$$

Donde:

$$\varepsilon(\%) = \text{eficiencia de extracción por etapas}$$

Una vez proporcionado los datos de la eficiencia y el número de etapas teóricas, se estableció el número de etapas reales para la columna de extracción, el cual se basó en la siguiente expresión.

$$\# \text{ etapas reales} = \frac{\# \text{ etapas teóricas}}{\varepsilon(\%)} \quad (4)$$

$$\# \text{ etapas reales} = \frac{7}{0,80}$$

$$\# \text{ etapas reales} = 8$$

3.6.1.4. Altura de la columna

Para establecimiento de la altura óptima de la columna (Z) se empleó la expresión propuesta por Perry (2019, p.1397) y los datos de HTU establecidos por McCabe et al., (2007: p.810).

$$N_{OR} = \# \text{ etapas reales} \quad (5)$$

$$Z = \frac{HTU * N_{OR}}{2} \quad (6)$$

Donde:

Z = altura de la columna

HTU= altura de la unidad de transferencia

N_{OR} = número de unidades de transferencia

El valor de N_{OR} se determinó a partir de la siguiente expresión:

$$N_{OR} = \# \text{ etapas reales}$$

$$N_{OR} = 8$$

Entonces la altura total de la columna se estableció como:

$$Z = \frac{HTU * N_{OR}}{2}$$

$$Z = \frac{0,30 * 8}{2}$$

$$Z = 1,2 \text{ m}$$

3.6.1.5. Diámetro de la columna

La estimación del diámetro adecuado para este tipo de columna según Perry (2019, p.1419) depende de dos parámetros: el sistema a separar y el material de los rellenos.

Tabla 11-3: Diámetros para columnas empaquetadas

Sistema	Diámetro columna (in)	Empaquetado
Agua-ácido acético-ciclohexano Metilciclohexano-etil acetato-benceno Agua-ácido acético-MIBK	1 1,95-3	sillines de 0,25 pulgadas anillos de 0,23 pulgadas Esferas de plástico de 0,375 pulgadas Anillos de plástico y cerámica de 0,375 pulg. Monturas de cerámica y plástico de 0,5 pulg.
Agua-ácido acético-tolueno Agua-cetona-hidrocarburo	6 1,88 2-4	Anillos Bialecki apilados de 1 pulgada Montz B1-300 Anillos de 0 25 y 0 375 pulgadas, cuentas de 6 mm Anillos de 0 5 y 0 75 pulgadas
Agua-cetona-tolueno	4 16,8 6 4	Anillos de 0,5 in, anillos Pall de 5/8 in, IMTP® 15, SMV estructurado, spray IMTP® 25, IMTP® 40, Intalox® 2T estructurado, spray Anillos Bialecki apilados de 1 pulgada

Fuente: Perry, 2019, p.1419.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

Un sistema ternario idóneo y alternativo para la realización de prácticas en este equipo es agua-ácido acético-MIBK. En la tabla 11-3 se observa que, para este sistema, el diámetro de columna está en el rango de 1,95-3 pulgadas, se escogió el valor de 2,75 pulgadas como diámetro interno.

$$T = 2,75 \text{ pulg} \approx 7,0 \text{ cm}$$

3.6.1.6. Esbeltez

La esbeltez es una propiedad de las columnas (K) que se obtiene de la relación entre la altura (Z) y el diámetro (T). Al no estar calculados los espesores, ni los soportes de la columna, se tomó en cuenta la relación entre la altura de la envolvente y el diámetro interior de la torre.

$$K = \frac{Z}{T} \quad (7)$$

Donde:

K= esbeltez de la columna

Z= altura de la columna

T= diámetro interno de la columna

$$K = \frac{1,20}{0,070}$$

$$K = 17,14$$

3.6.1.7. Volumen de mallas

$$V_{MALLAS} = \pi * r_m^2 * h_m * 1000 \quad (8)$$

$$V_{MALLAS_{TOTALES}} = V_{MALLAS} * \#_{MALLAS} \quad (9)$$

Donde:

r_m = radio de malla

h_m = altura de malla

Para la estimación de la altura de cada malla, se utilizó la relación entre la altura total de la unidad de transferencia y el número de unidades de transferencia de masa.

$$h_m = \frac{HTU}{N_{OR}} \quad (10)$$

$$h_m = \frac{0,30}{8}$$

$$h_m = 0,038 \text{ m}$$

Entonces el volumen de cada malla y el volumen total de las mallas fueron determinadas como:

$$V_{MALLAS} = \pi * 0,035^2 * 0,038 * 1000$$

$$V_{MALLAS} = 0,146$$

$$V_{MALLAS_{TOTALES}} = V_{MALLAS} * \#_{MALLAS}$$

$$V_{MALLAS_{TOTALES}} = 0,146 * 8$$

$$V_{MALLAS_{TOTALES}} = 1,169 L$$

3.6.1.8. Volumen de la columna

El volumen de la columna se estableció a partir de la siguiente ecuación.

$$V_{COLUMNA} = (\pi * r_c^2 * Z * 1000) - V_{MALLAS_{TOTALES}} \quad (11)$$

Donde:

r_c = radio de columna (m)

Z= altura de columna (m)

$$V_{COLUMNA} = (\pi * 0,035^2 * 1,20 * 1000) - 1,169$$

$$V_{COLUMNA} = 3,449 L$$

3.6.2. Cálculos para dimensionamiento del sistema hidráulico

Dentro del diseño hidráulico, el parámetro más importante fue el diámetro de las tuberías; para la estimación de estos valores fue necesario asignar una velocidad del fluido según su viscosidad y tipo de flujo. Estos datos fueron tomados de la tabla 12-3.

Tabla 12-3: Velocidad de fluidos en tuberías

Fluido	Tipo de flujo	Velocidad	
		Ft/s	m/s
Líquidos poco viscosos	Flujo por gravedad	0,5-1	0,15-0,30
	Entrada de bomba	1-3	0,3-0,9
	Salida de bomba	4-10	1,2-3
Líquidos viscosos	Línea de conducción	4-8	1,2-2,4
	Entrada de bomba	0,2-0,5	0,06-0,15
	Salida de bomba	0,5-2	0,15-0,6
Vapor de agua		30-50	9-15
Aire o gas		30-100	9-30

Fuente: Treybal, 1998, p.447.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

Tabla 13-3: Características de las tuberías de acero

Tubería de acero						
Serie normal y reforzada			UNE 19.040/93		UNE 19.041/93	
Diámetro	Nominal	Diámetro exterior	Espesor	Diámetro interior	Espesor	Diámetro interior
mm	in	mm	mm	mm	mm	mm
DN 6	1/8	10,2	2,0	6,20	2,6	5,00
DN 8	¼	13,5	2,3	8,90	2,9	7,70
DN 10	3/8	17,2	2,3	12,60	2,9	11,40
DN 15	½	21,3	2,6	16,10	3,2	14,90
DN 20	¾	26,9	2,6	21,70	3,2	20,50
DN 25	1	33,7	3,2	27,30	4,0	25,70
DN 32	1.1/4	42,4	3,2	36,00	4,0	34,40
DN 40	1.1/2	48,3	3,2	41,90	4,0	40,30
DN 50	2	60,3	3,6	53,10	4,5	51,30
DN 65	2.1/2	76,1	3,6	68,90	4,5	67,10
DN 80	3	88,9	4,0	80,90	5,0	78,90
DN 100	4	114,3	4,5	105,30	5,4	103,50
DN 125	5	139,7	5,0	129,70	5,4	128,90
DN 150	6	165,1	5,0	155,10	5,4	154,30

Fuente: Ingenieros consultores S. L., 2017, p.4.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

3.6.2.1. Tramo 1

Conduce la alimentación desde el tanque de mezcla hasta la entrada lateral, en la parte inferior de la columna. Para el cálculo del diámetro interno de la tubería en este tramo, el fluido tuvo una velocidad de 0,30 m/s (en base a la estimación de la tabla 12-3). A partir de la relación entre el flujo másico y la densidad, se determinó el caudal circundante en cada uno de los tramos.

$$Q = \frac{F}{\rho} \quad (12)$$

Donde:

Q=caudal, m^3/s

F=flujo masico, Kg/s

ρ =densidad, Kg/m^3

$$Q = \frac{0,011}{755} = 1,47e^{-5} m^3/s$$

Para el diámetro interno teórico se hizo uso de la ecuación 13.

$$D_{int} = \sqrt{\frac{Q * 4}{\pi * v}} \quad (13)$$

Donde:

D_{int} = diámetro teórico interno (m)

Q = caudal, m^3/s

v = velocidad de flujo, m/s

$$D_{int} = \sqrt{\frac{1,47e^{-5} * 4}{\pi * 0,30}} = 7,89e^{-3} m = 7,89 mm$$

Los valores reales del diámetro interno, externo y nominal se obtuvieron a partir de la tabla 13-3.

$$D_{interno} = 8,90 mm$$

$$D_{externo} = 13,5 mm$$

$$D_{nominal} = 1/4 pulg$$

$$v_{real} = \frac{Q * 4}{\pi * D^2} \quad (14)$$

$$v_{real} = \frac{1,47e^{-5} * 4}{\pi * (8,9e^{-3})^2} = 0,24 m/s$$

3.6.2.2. Tramo 2

Conduce el solvente desde el tanque de almacenamiento hasta la entrada lateral, en la parte superior de la columna. Para el cálculo del diámetro interno de la tubería en este tramo, el fluido presentó una velocidad de 0,25 m/s (estimación de la tabla 12-3).

$$Q = \frac{F}{\rho}$$

$$Q = \frac{0,016}{1000} = 1,6e^{-5} m^3/s$$

$$D_{int} = \sqrt{\frac{Q * 4}{\pi * v}}$$

$$D_{int} = \sqrt{\frac{1,6e^{-5} * 4}{\pi * 0,30}} = 8,24e^{-3} \text{ m} = 8,24 \text{ mm}$$

Los valores reales del diámetro interno, externo y nominal se obtuvieron a partir de la tabla 13-3.

$$D_{interno} = 8,90 \text{ mm}$$

$$D_{externo} = 13,5 \text{ mm}$$

$$D_{nominal} = 1/4 \text{ pulg}$$

$$v_{real} = \frac{Q * 4}{\pi * D^2}$$

$$v_{real} = \frac{1,6e^{-5} * 4}{\pi * (8,9e^{-3})^2} = 0,26 \text{ m/s}$$

3.6.2.3. Tramo 3

Conduce el extracto desde la salida lateral en la parte inferior de la columna, hasta el tanque de almacenamiento. Para el cálculo del diámetro interno de la tubería en este tramo, el fluido tuvo una velocidad de 0,30 m/s (estimación de la tabla 12-3).

$$Q = \frac{F}{\rho}$$

$$Q = \frac{0,016}{970} = 1,64 e^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$D_{int} = \sqrt{\frac{Q * 4}{\pi * v}}$$

$$D_{int} = \sqrt{\frac{1,64e^{-5} * 4}{\pi * 0,30}} = 8,34e^{-3} = 8,34 \text{ mm}$$

Los valores reales del diámetro interno, externo y nominal se obtuvieron a partir de la tabla 13-3.

$$D_{interno} = 8,90 \text{ mm}$$

$$D_{externo} = 13,5 \text{ mm}$$

$$D_{nominal} = 1/4 \text{ pulg}$$

$$v_{real} = \frac{Q * 4}{\pi * D^2}$$

$$v_{real} = \frac{1,64 e^{-5} * 4}{\pi * (8,90 e^{-3})^2} = 0,26 \text{ m/s}$$

3.6.2.4. Tramo 4

Conduce el refinado desde la salida lateral en la parte superior de la columna, hasta el tanque de almacenamiento. Para el cálculo del diámetro interno de la tubería en este tramo se estimó que el fluido mostró una velocidad de 0,30 m/s (estimación de la tabla 12-3).

$$Q = \frac{F}{\rho}$$

$$Q = \frac{0,011}{720} = 1,52 e^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$D_{int} = \sqrt{\frac{Q * 4}{\pi * v}}$$

$$D_{int} = \sqrt{\frac{1,52 e^{-5} * 4}{\pi * 0,30}} = 8,031 e^{-3} = 8,031 \text{ mm}$$

Los valores reales del diámetro interno, externo y nominal fueron tomados de la tabla 13-3.

$$D_{interno} = 8,90 \text{ mm}$$

$$D_{externo} = 13,5 \text{ mm}$$

$$D_{nominal} = 1/4 \text{ pulg}$$

$$v_{real} = \frac{Q * 4}{\pi * D^2}$$

$$v_{real} = \frac{1,52 e^{-5} * 4}{\pi * (8,90 e^{-3})^2} = 0,24 \text{ m/s}$$

3.6.3. Cálculos para el dimensionamiento del sistema de agitación

La columna de extracción tipo *Scheibel* se caracteriza por tener un eje central rotatorio al cual van adheridas aspas que, a través de interacción de energía mecánica, ayudan a obtener una separación más rápida de la sustancia objetivo, dando lugar a la formación de las dos fases. Las medidas del eje rotatorio y las hélices se tomaron de manera arbitraria. La velocidad de rotación del eje varía entre 300 a 700 rpm, razón por la cual se hizo uso de poleas para reducir la rapidez de giro del motor.

$$R_2 = R_1 * I \quad (15)$$

Donde:

R_2 = rapidez de la polea conductora

R_1 = rapidez de la polea conducida

I = relación de tamaños de poleas

$D_{polea\ conductora} = 5\ cm$

$D_{polea\ conducida} = 13\ cm$

$$I = \frac{5}{13} = 0,384$$

$R_1 = 1720\ rpm$

$R_2 = R_1 * I$

$R_2 = 1720 * 0,384 = 660,4\ rpm$

3.6.4. Cálculos para el dimensionamiento del sistema de soporte

El dimensionamiento de los recipientes se realizó de acuerdo al tamaño de la estructura y la columna.

$$V_{tanque\ 1} = \frac{ancho * largo * alto}{1000} \quad (16)$$

Donde:

$ancho = 20\ cm$

$largo = 20\ cm$

$alto = 17\ cm$

$$V_{tanque\ 1} = \frac{20 * 20 * 17}{1000}$$

$V_{tanque\ 1} = 6,80\ L$

Por razones de simetría, el tanque 2 posee las mismas dimensiones que el tanque 1. Se diseñó una estructura principal sujeta con 4 soportes de 30 mm de diámetro cada una, además se incluyó una estructura secundaria delantera con el objeto de brindar soporte a las tuberías, caudalímetros y la columna de vidrio. Se usaron dos abrazaderas para sujetar la columna a la estructura secundaria, además se fabricaron dos chumaceras para la rotación del eje central.

3.7. Cálculos para determinación de la eficiencia de extracción y rendimiento del equipo

3.7.1. Representación gráfica del balance de masa para el sistema de extracción

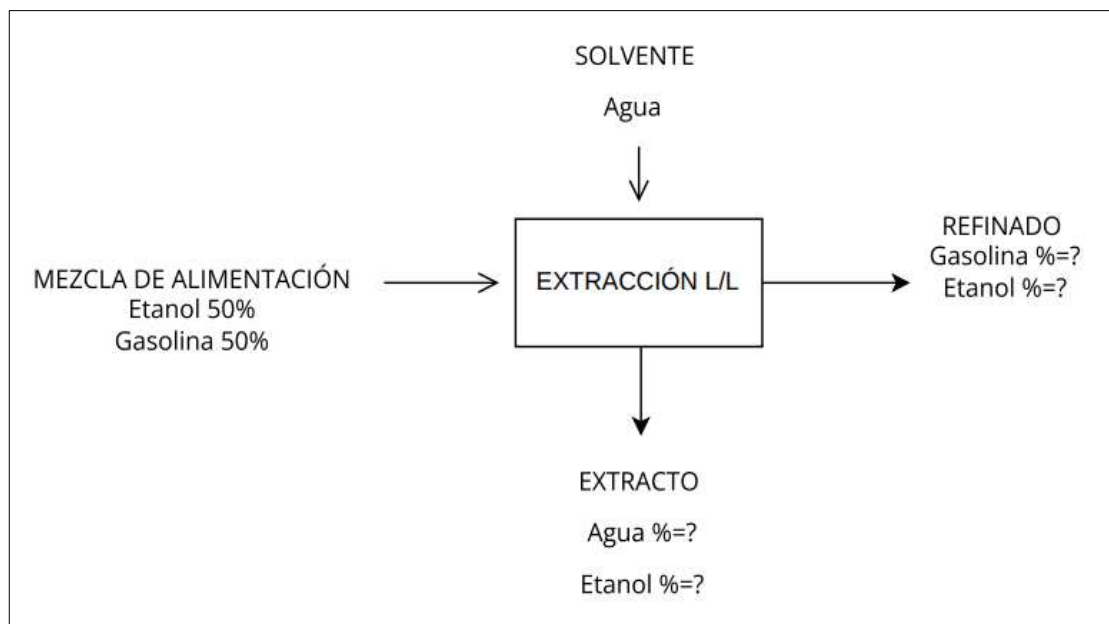


Ilustración 2-3. Balance de masa en el sistema de extracción: gasolina-etanol-agua.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

El balance de masa se realizó en estado estacionario. La relación de volúmenes mezcla -solvente donde se obtuvo una mejor eficiencia de extracción según Trujillo (2012, p.47) fue de 1:2, razón por la cual se tomó esta proporción para el cálculo teórico y experimental. Debido a la mínima concentración de gasolina existente en el extracto, y agua en el refinado se despreciaron estos valores para facilitar los cálculos en los balances de masa para el sistema de extracción.

3.7.2. Cálculos teóricos para balance de masa

Los datos teóricos del coeficiente de reparto y relación mezcla solvente fueron tomados del proyecto de investigación “Determinación de la solubilidad de Etanol Anhidro y Etanol Acuoso en gasolina sintética y refinada y la tolerancia de agua a 298,15 K, 308,15 K, 318,15 K.” del apartado específico “Sistema ternario gasolina sintética-etanol-agua a 298.15 K” (Trujillo, 2012, p.47).

3.7.2.1. Determinación del Coeficiente de reparto

Para la determinación del coeficiente de reparto se tomaron los datos de las concentraciones de etanol de la tabla 7-3, se procedió a obtener un promedio de los valores en el extracto y refinado.

Tabla 14-3. Coeficientes de reparto en extracto y refinado

Concentración de etanol en el extracto (X_{EE})	Concentración de etanol en el refinado (X_{ER})
0,1445	0,0077
0,3510	0,0120
0,5485	0,0471
0,5854	0,0646
0,7168	0,0800
0,7028	0,0876
0,7018	0,1225
Promedio: 0,5081	Promedio: 0,0602

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

$$K_p = \frac{X_{EE}}{X_{ER}} \quad (17)$$

Donde:

K_p = Coeficiente de extracción

X_{EE} = Fracción de etanol en el extracto

X_{ER} = Fracción de etanol en el refinado

$$K_p = \frac{0,5081}{0,062}$$

$$K_p = 8,439$$

3.7.2.2. Densidad de la mezcla

$$\rho_F = \rho_G X_G + \rho_E X_E \quad (18)$$

Donde:

ρ_F = Densidad de la mezcla de alimentación, Kg/m^3

ρ_G = Densidad de la gasolina, Kg/m^3

X_G = Fracción de la gasolina en la mezcla de alimentación

ρ_E = Densidad del etanol, Kg/m^3

X_E = Fracción del etanol en la mezcla de alimentación

$$\rho_F = 720 * (0,50) + 790 * (0,50)$$

$$\rho_F = 755 \text{ Kg}/m^3$$

3.7.2.3. Volumen de la mezcla de alimentación

$$V_F = 1 \text{ L}$$

3.7.2.4. Volumen del solvente de extracción

$$V_S = 2 \text{ L}$$

3.7.2.5. Masa de alimentación

$$\rho_F = \frac{m_F}{V_F} \quad (19)$$

Donde:

ρ_F = Densidad de la mezcla de alimentación

m_F = Masa de la mezcla de alimentación

V_F = Volumen de la mezcla de alimentación

$$m_F = \rho_F * V_F$$

$$m_F = 755 * 0,001$$

$$m_F = 0,755 \text{ Kg}$$

3.7.2.6. Masa de solvente (agua)

$$\rho_A = \frac{m_A}{V_A} \quad (20)$$

Donde:

ρ_A = Densidad del solvente

m_A = Masa del solvente

V_A = Volumen del solvente

$$m_A = \rho_A * V_A$$

$$m_A = 1000 * 0,002$$

$$m_A = 2 \text{ Kg}$$

3.7.2.7. Balance de masa para el etanol

$$F_{X_{EF}} = E_{X_{EE}} + R_{X_{ER}} \quad (21)$$

Donde:

$F_{X_{EF}}$ = Cantidad de etanol en la mezcla de alimentación

$E_{X_{EE}}$ = Cantidad de etanol en el extracto

$R_{X_{ER}}$ = Cantidad de etanol en el refinado

$$0,755 * 0,50 = m_{EE} + m_{ER}$$

$$m_{EE} = 0,377 - m_{ER} \quad (22)$$

3.7.2.8. Balance de masa para la gasolina

$$F_{X_{GF}} = R_{X_{GR}} \quad (23)$$

Donde:

$F_{X_{GF}}$ = Cantidad de gasolina en la mezcla de alimentación

$R_{X_{GR}}$ = Cantidad de gasolina en el refinado

$$0,55 * 0,50 = m_{GR}$$

$$m_{GR} = 0,377 \text{ Kg}$$

3.7.2.9. Balance de masa para el solvente (agua)

$$A_{X_A} = E_{X_{AE}} \quad (24)$$

Donde:

A_{X_A} = Cantidad de agua en el solvente

$E_{X_{AE}}$ = Cantidad de agua en el extracto

$$2 = m_{SE}$$

$$m_{SE} = 2 \text{ Kg}$$

Para calcular la masa de etanol presente en el extracto y en el refinado se hace uso del coeficiente de distribución, ecuación 17.

$$K_P = \frac{X_{EE}}{X_{ER}}$$

$$8,439 = \frac{X_{EE}}{X_{ER}}$$

$$8,439 = \frac{\frac{m_{EE}}{m_{SE} + m_{EE}}}{\frac{m_{ER}}{m_{GR} + m_{ER}}}$$

$$8,439 = \frac{m_{EE}(m_{GR} + m_{ER})}{m_{ER}(m_{SE} + m_{EE})}$$

$$8,439 = \frac{(0,377 - m_{ER})(0,377 + m_{ER})}{m_{ER}((0,377 - m_{ER}) + 2)}$$

$$8,439 = \frac{(0,142 - 0,377m_{ER} - 0,377m_{ER} - m_{ER}^2)}{(0,377m_{ER} - m_{ER}^2 + 2 m_{ER})}$$

$$8,439(2,377m_{ER} - m_{ER}^2) = 0,142 - 0,754m_{ER} - m_{ER}^2 - 7,439m_{ER}^2 + 20,813m_{ER} - 0,142 = 0$$

$$m_{ER} = 0,0068 \text{ kg}$$

Reemplazando m_{ER} en la ecuación 22 se tiene:

$$m_{EE} = 0,377 - m_{ER}$$

$$m_{EE} = 0,377 - 0,0068$$

$$m_{EE} = 0,370 \text{ Kg}$$

3.7.2.10. Masa del extracto

$$m_E = m_{EE} + m_{AE} \quad (25)$$

Donde:

m_E = Masa de extracto

m_{EE} = Masa de etanol en el extracto

m_{AE} = Masa de agua en el extracto

$$m_E = 0,370 + 2$$

$$m_E = 2,370 \text{ Kg}$$

3.7.2.11. Fracción de etanol y solvente en el extracto

$$X_{EE} = \frac{m_{EE}}{m_E} \quad (26)$$

Donde:

X_{EE} = Fracción de etanol en el extracto

m_{EE} = Masa de etanol en el extracto

m_E = Masa del extracto

$$X_{EE} = \frac{0,370}{2,370}$$

$$X_{EE} = 0,156$$

$$X_{SE} = 1 - 0,156$$

$$X_{SE} = 0,843$$

3.7.2.12. Masa del refinado

$$m_R = m_{ER} + m_{GR} \quad (27)$$

Donde:

m_R = Masa de refinado

m_{ER} = Masa de etanol en el refinado

m_{GR} = Masa de agua en el refinado

$$m_R = 0,0068 + 0,377$$

$$m_R = 0,383 \text{ Kg}$$

3.7.2.13. Fracción de etanol y gasolina en el refinado

$$X_{ER} = \frac{m_{ER}}{m_R} \quad (28)$$

Donde:

X_{ER} = Fracción de etanol en el refinado

m_{ER} = Masa de etanol en el refinado

m_R = Masa del refinado

$$X_{ER} = \frac{0,0068}{0,383}$$

$$X_{ER} = 0,018$$

$$X_{GR} = 1 - 0,018$$

$$X_{GR} = 0,982$$

3.7.2.14. Eficiencia teórica de extracción

$$\eta = \frac{m_{EE}}{m_{EF}} * 100 \quad (29)$$

Donde:

η = Eficiencia de extracción

m_{EE} = Masa de etanol en el extracto

m_{EF} = Masa de etanol en la mezcla

$$\eta = \frac{0,370}{0,377} * 100$$

$$\eta = 98 \%$$

3.7.3. Cálculos experimentales para balance de masa

Se consideró una alimentación de 1 L, corriente que contiene 50% en peso de etanol en gasolina que se va a extraer con 2 L de agua. Ambas corrientes ingresan a la columna a 20 °C y 0,72 atm de presión. Por motivos de seguridad el llenado máximo de la columna es del 90%.

3.7.3.1. Valores de índices de refracción

Se tomaron muestras de la fase superior e inferior para su análisis y se obtuvo una tabla de calibración (tabla 15-3), con el índice de refracción de las soluciones a distintas concentraciones

conocidas en un rango 0 a 100 % en masa de etanol con variaciones de 10 en 10, estos datos fueron necesarios para determinar la composición en fracción masa y fracción mol del soluto en el extracto (agua -etanol), a través de interpolación.

Tabla 15-3. Índice de refracción de las soluciones (etanol-agua) a temperatura ambiente

Concentración nominal % m/m etanol en agua	Índice de refracción			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
100	1,36398	1,36388	1,36398	1,36395
90	1,36496	1,36497	1,36469	1,36487
80	1,36318	1,36316	1,36312	1,36315
70	1,36014	1,36014	1,36015	1,36014
60	1,35678	1,35679	1,35679	1,35679
50	1,35764	1,35764	1,35762	1,35763
40	1,35284	1,35287	1,35290	1,35287
30	1,34791	1,34791	1,34790	1,34791
20	1,34266	1,34267	1,34268	1,34267
10	1,33778	1,33777	1,33780	1,33778
0	1,33299	1,33299	1,33298	1,33299

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

3.7.3.2. Volumen real de la columna

$$V_R = 3,449 L$$

3.7.3.3. Volumen disponible

$$V_D = 3,449 * 0,90$$

$$V_D = 3 L$$

3.7.3.4. Volumen de mezcla utilizada

$$V_F = 1 L$$

3.7.3.5. Densidad de la mezcla

$$\rho_F = \rho_G X_G + \rho_E X_E \quad (30)$$

Donde:

ρ_F = Densidad de la mezcla de alimentación, Kg/m^3

ρ_G = Densidad de la gasolina, Kg/m^3

X_G = Fracción de la gasolina en la mezcla de alimentación

ρ_E = Densidad del etanol, Kg/m^3

X_E = Fracción del etanol en la mezcla de alimentación

$$\rho_F = 720 * (0,50) + 790 * (0,50)$$

$$\rho_F = 755 \text{ Kg/m}^3$$

3.7.3.6. Masa de la mezcla

$$m_F = \rho_F * V_F \quad (31)$$

Donde:

ρ_F = Densidad de la mezcla de alimentación

m_F = Masa de la mezcla de alimentación

V_F = Volumen de la mezcla de alimentación

$$m_F = 755 * 0,001$$

$$m_F = 0,755 \text{ Kg}$$

3.7.3.7. Masa de etanol en la mezcla

$$m_{EF} = m_F * X_{EF} \quad (32)$$

Donde:

m_{EF} = Masa de etanol en la mezcla de alimentación

m_F = Masa de la mezcla de alimentación

X_{EF} = Fracción de etanol en la mezcla de alimentación

$$m_{EF} = 0,755 * 0,5$$

$$m_{EF} = 0,377 \text{ Kg}$$

3.7.2.8. Masa de gasolina en la mezcla

$$m_{GF} = m_F * X_{GF} \quad (33)$$

Donde:

m_{GF} = Masa de gasolina en la mezcla de alimentación

m_F = Masa de la mezcla de alimentación

X_E = Fracción de gasolina en la mezcla de alimentación

$$m_{GF} = 0,755 * 0,5$$

$$m_{GF} = 0,377 \text{ Kg}$$

3.7.3.9. *Volumen de solvente utilizado*

$$V_A = 2 \text{ L}$$

3.7.3.10. *Masa de solvente (agua)*

$$m_A = \rho_A * V_A \quad (34)$$

Donde:

ρ_A = Densidad del solvente

m_A = Masa del solvente

V_A = Volumen del solvente

$$m_A = 1000 * 0,002$$

$$m_A = 2 \text{ Kg}$$

3.7.3.11. *Concentración de etanol en el extracto*

Usando el refractómetro se estableció la medida del índice de refracción en el extracto.

$$IR_E = 1,3436$$

Interpolando en la tabla 18-3 se obtuvo la concentración de:

$$\% E_E = 15\%$$

3.7.3.12. *Fracción de etanol en el extracto*

$$X_{EE} = 0,15$$

3.7.3.13. *Concentración del agua en el extracto*

$$\% A_E = 85\%$$

3.7.3.14. Fracción de agua en el extracto

$$X_{A_E} = 0,85$$

3.7.3.15. Masa de agua extracto

$$m_{A_E} = m_A \quad (35)$$

Donde:

m_{A_E} = Masa de agua en el extracto

m_A = Masa de agua en el solvente

$$m_{A_E} = 2 \text{ Kg}$$

3.7.3.16. Masa del etanol en el extracto

$$\% E_E = \frac{m_{E_E}}{m_{A_E} + m_{E_E}} * 100 \quad (36)$$

Donde:

$\% E_E$ = Porcentaje de masa de etanol en el extracto

m_{E_E} = Masa de etanol en el extracto

m_{A_E} = Masa de agua en el extracto

$$15 = \frac{m_{E_E}}{m_{A_E} + 2} * 100$$

$$m_{E_E} = 0,325 \text{ Kg}$$

3.7.3.17. Masa de gasolina en el refinado

$$m_{G_R} = m_{G_F} \quad (37)$$

Donde:

m_{G_R} = Masa de gasolina en el refinado

m_{G_F} = Masa de gasolina en la mezcla de alimentación

$$m_{GR} = 0,377 \text{ Kg}$$

3.7.3.18. Masa de etanol en el refinado

$$m_{ER} = m_{EF} - m_{EE} \quad (38)$$

Donde:

m_{ER} = Masa de etanol en el refinado

m_{EF} = Masa de etanol en la mezcla de alimentación

m_{EE} = Masa de etanol en el extracto

$$m_{ER} = 0,377 - 0,325$$

$$m_{ER} = 0,052 \text{ Kg}$$

3.7.3.19. Fracción del etanol en el refinado

$$X_{ER} = \frac{m_{ER}}{m_{ER} + m_{GR}} \quad (39)$$

Donde:

X_{ER} = Fracción de etanol en el refinado

m_{ER} = Masa de etanol en el refinado

m_{GR} = Masa de gasolina en el refinado

$$X_{ER} = \frac{0,052}{0,052 + 0,377}$$

$$X_{ER} = 0,12$$

3.7.3.20. Concentración del etanol en el refinado

$$\% E_R = 12\%$$

3.7.3.21. Fracción de la gasolina en el refinado

$$X_{GR} = 1 - X_{ER} \quad (40)$$

Donde:

X_{GR} = Fracción de gasolina en el refinado

X_{ER} = Fracción de etanol en el refinado

$$X_{GR} = 1 - 0,12$$

$$X_{GR} = 0,88$$

3.7.3.22. Concentración de gasolina en el refinado

$$\%G_R = 88\%$$

3.7.3.23. Eficiencia experimental de extracción

$$\eta = \frac{m_{EE}}{m_{EF}} * 100 \quad (41)$$

Donde:

η = Eficiencia de extracción

m_{EE} = Masa de etanol en el extracto

m_{EF} = Masa de etanol en la mezcla de alimentación

$$\eta = \frac{0,325}{0,377} * 100$$

$$\eta = 86 \%$$

3.7.4. Rendimiento del equipo

$$\text{Rendimiento} = \frac{m_{ER}}{m_{ET}} * 100 \quad (42)$$

Donde:

m_{ER} = Masa de etanol experimental presente en el extracto

m_{ET} = Masa de etanol teórica presente en el extracto

$$\text{Rendimiento} = \frac{0,325}{0,370} * 100$$

$$\text{Rendimiento} = 88\%$$

3.8. Simulación del modelo del equipo

Previo a la construcción de la columna de extracción L/L, se realizó una simulación del modelo del equipo con el software FUSION 360, para visualizar el diseño en 3D.

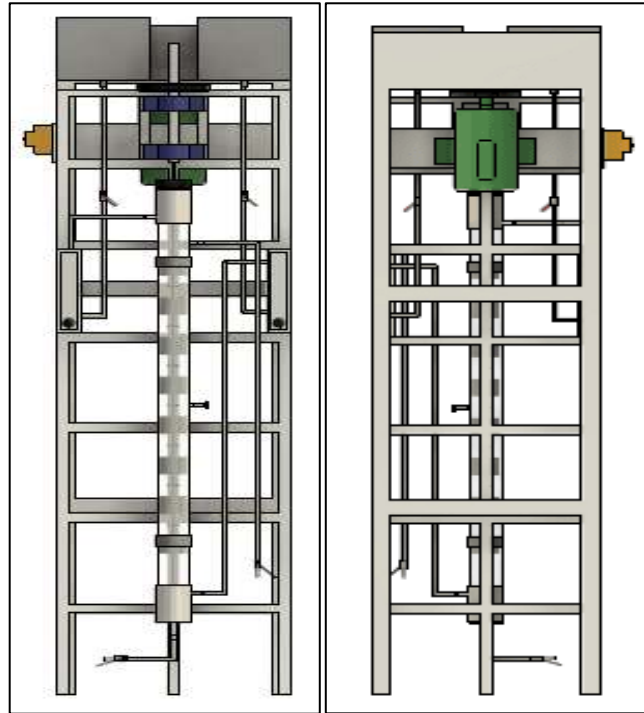


Ilustración 3-3: Vista frontal y posterior.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

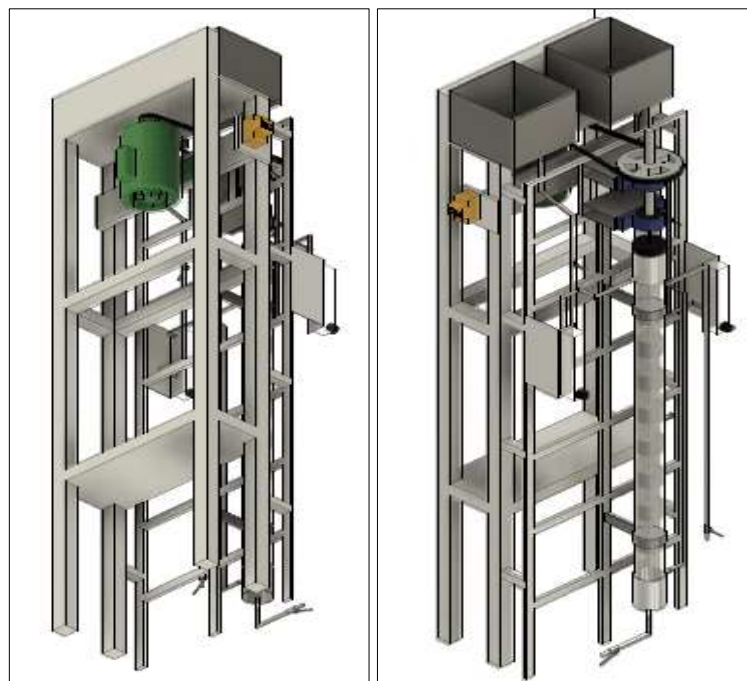


Ilustración 4-3: Visualización 3D del equipo.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

3.9. Construcción del extractor L/L

En este apartado se detalla: el proceso de fabricación de la columna de extracción, las herramientas y los equipos involucrados en la construcción y la descripción de las funciones de cada componente presente en el sistema.

3.9.1. *Tubo tipo columna*

La columna de vidrio borosilicato es un cilindro con dimensiones de 76 mm de diámetro exterior y 70 mm de diámetro interior, una altura de 120 cm; dotada de 5 salidas: dos en la parte superior, dos en la inferior y una en la parte central de la base. La finalidad de esta columna es albergar la mezcla y el solvente para permitir la visualización de la transferencia de masa, durante la formación de las dos fases cuando se realiza la agitación mecánica con el encendido del equipo.



Ilustración 5-3: Columna de vidrio.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

3.9.2. *Mecanismo de agitación y mallas de relleno*

Este sistema cuenta con un motor asociado a dos poleas de reducción mediante una banda y un eje central al cual van adheridas hélices. El eje está introducido en la columna de vidrio para realizar rotación y facilitar la separación del soluto de la mezcla de alimentación. Al igual que el

eje, ocho rellenos de plástico están distribuidos homogéneamente dentro de la columna con la finalidad de generar mayor superficie de contacto entre las sustancias del proceso de extracción.



Ilustración 6-3: Chumaceras, poleas y eje.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

3.9.2.1. Especificaciones técnicas del motor

Marca: WEG

Potencia: ½ HP

Voltaje: 110/220 V

Amperaje: 8.40/4.20 A

RPM: 1720

Código: K

Procedencia: Brasil

3.9.3. Tuberías y accesorios

El sistema de tuberías para entrada y salida de la columna son de acero inoxidable con un diámetro comercial de ¼ , las tuberías de entrada tienen origen en los tanques de almacenamiento, cada cual con una válvula de seguridad incorporada en la parte superior y con flujómetros de panel con válvula de regulación ubicadas en la parte central; esto con el objeto de determinar y medir el caudal que fluye hacia la columna, las tuberías de salida también están provistas de válvulas tipo bola en la parte final.



Ilustración 7-3: Tubería con válvula de bola.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

3.9.3.1. Especificaciones técnicas de flujómetros de panel con válvula.

Cuerpo: Acrílico

Conexiones: Polipropileno

Guía: Acero inoxidable 304

Flotador: Acero inoxidable 304

Límites de caudal: 0,2-2 GPM

Presión máxima: 120 PSI

Temperatura máxima: +-55 °C

Exactitud: +- 5%

Procedencia: Estados Unidos

3.9.4. Tanques de almacenamiento

El equipo posee dos tanques, el tanque izquierdo es para el solvente y el derecho es para la mezcla de alimentación, estos tienen las dimensiones de 20 cm de ancho, 20 cm de largo por 17 cm de alto, con una capacidad total de 6,8 L cada uno; estos sirven para contener las sustancias involucradas en el proceso de extracción.



Ilustración 8-3: Tanques de acero inoxidable.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

3.9.5. Estructura de soporte del equipo

Para la construcción de la estructura de soporte se utilizaron tubos cuadrados de acero estructural A36. La estructura principal, cuya función es brindar soporte a los tanques y el motor, tiene un diámetro de 3 cm. La estructura secundaria donde se soportan el sistema de tuberías y la columna de vidrio tienen un diámetro de 2,5 cm.



Ilustración 9-3: Estructura metálica.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

3.10. Procedimientos y equipos para la construcción

3.10.1. Soplado

Para la fabricación de las salidas en la columna de vidrio se usó un soplete para moldear el borosilicato mediante la inyección de gas oxígeno, técnica denominada “vidrio soplado”.



Ilustración 10-3: Sopladora para vidrio.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

3.10.2. Corte y perforaciones

Para el proceso de corte de los materiales del equipo se empleó una sierra automática, la cual a través de un movimiento de traslación penetra el material. El taladro de pedestal se empleó para perforar los tanques de almacenamiento y otros lugares para el entornillado.



Ilustración 11-3: Sierra para metales.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

3.10.3. Soldadura

Se utilizó el equipo de soldadora MIG para soldar el acero estructural A36 y la soldadora TIG para unir el acero inoxidable 304 en el sistema de tuberías, tanques de almacenamiento y mecanismo de agitación.



Ilustración 12-3: Soldadora MIG y TIG.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

3.10.4. Torneado

Un torno paralelo se empleó para el proceso de maquinados, acoplamiento de ejes en las poleas y ajuste de poleas en el motor.



Ilustración 13-3: Torno.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

3.10.5. Ranurados

Una roscadora eléctrica permitió dar forma de rosca a los tubos de acero inoxidable esto con la finalidad de acoplar las diferentes dimensiones de las tuberías.



Ilustración 14-3: Roscadora eléctrica.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

3.10.6. Pintado

Para la adhesión de la pintura a la estructura se empleó un compresor y mediante el incremento de la presión ayudó a que este proceso se desarrolle de una manera rápida y óptima.



Ilustración 15-3: Compresor para pintura.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados del dimensionamiento del equipo

Este Trabajo de Integración Curricular, tipo Proyecto Técnico con el tema: “Diseño y construcción de una columna de extracción para el Laboratorio de Operaciones Unitarias-ESPOCH, fue realizado en base a revisión de diversas fuentes bibliográficas como: libros de ingeniería química, artículos científicos, publicaciones de revistas y tesis de ingeniería y maestría; además de la consulta de las normativas internacionales: ASME, ASTM y AISI, las cuales permitieron establecer lineamientos para la selección de materiales y construcción del equipo.

La columna de extracción construida tiene como función la separación de una sustancia determinada presente en una mezcla líquida homogénea, gracias a la acción de un solvente que entra en contacto con ésta mediante un sistema de agitación mecánico, que favorece la transferencia de masa durante proceso de extracción. El sistema de agitación es característico del modelo de columna de extracción *Scheibel*, el cual tiene la ventaja de permitir una rápida extracción y obtener un mayor rendimiento en comparación con otros modelos de equipos de extracción líquida. El dimensionamiento del equipo fue realizado en base a ecuaciones de diseño tomadas del Manual del Ingeniero Químico de Perry (2019, pp. 1449-1494) y los libros: Operaciones Unitarias de Ingeniería Química de McCabe et al., (2007: pp. 808-826) y Operaciones de Transferencia de Treybal (1998, pp. 529-600).

El sistema de extracción elegido: gasolina-etanol-agua, permitió obtener datos experimentales para el cálculo de la eficiencia real de extracción, mientras que los datos para el cálculo de la eficiencia teórica fueron tomados de los resultados obtenidos por Trujillo (2012, pp: 38-62). Las variables de operación del equipo son: temperatura y presión. La columna de extracción opera de forma adiabática, a temperatura ambiente (20 °C) y presión atmosférica (0,72 atm) de la ciudad de Riobamba. El equipo fue dimensionado a escala de laboratorio y los materiales utilizados en su construcción como el vidrio borosilicato 3.3 y el acero inoxidable en tuberías, lo hacen idóneo para realizar prácticas de laboratorio. Entre las ventajas del equipo se tiene: facilidad para su desmontaje, operación sencilla de válvulas, sistema simple de encendido/apagado y condiciones seguras de operación.

Los resultados del dimensionamiento del equipo se dividen en cuatro secciones. La tabla 1-4 muestra las dimensiones de la columna de extracción en cuanto a altura, diámetro, volumen y

rellenos y la tabla 2-4 presenta los parámetros que caracterizan las tuberías del equipo, las cuales se dividen en cuatro tramos correspondientes al ingreso de la mezcla, ingreso del solvente, salida del extracto y salida del refinado.

Tabla 1-4: Dimensionamiento de la columna de extracción L/L

Parámetro	Especificación
Altura de la columna (Z)	1,20 m
Diámetro de la columna (T)	0,064 m
Número de etapas reales	8
Altura de la unidad de transferencia (HTU)	0,32 m
Número de unidades de transferencia (N_{OR})	8
Altura de mallas (h_m)	0,038 m
Volumen total de mallas	1,169 L
Volumen de columna	3,449 L

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

Tabla 2-4: Resultados del dimensionamiento del sistema de tuberías

Parámetro	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4
Diámetro interno	8,90 mm	8,90 mm	8,90 mm	8,90 mm
Diámetro externo	13,5 mm	13,5 mm	13,5 mm	13,5 mm
Diámetro nominal	¼ pulg	¼ pulg	¼ pulg	¼ pulg
Velocidad real	0,24 m/s	0,26 m/s	0,26 m/s	0,24 m/s
Accesorios	1 válvula de bola 1 caudalímetro con válvula 2 codos roscados de 90° 2 uniones universales 1 reductores de ½ a ¼ 4 abrazaderas metálicas	1 válvula de bola 1 caudalímetro con válvula 2 codos roscados de 90° 2 uniones universales 2 reductores de ½ a ¼ 6 abrazaderas metálicas	1 válvula de bola 1 codo estándar de 90° 2 abrazaderas metálicas	1 válvula de bola 1 codo estándar de 90° 2 abrazaderas metálicas

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

Las dimensiones del sistema de agitación se observan en la tabla 3-4, donde se establecen características mecánicas del motor y dimensiones de los elementos de agitación, mientras que las dimensiones de las estructuras de soporte para la columna y dimensiones de los tanques de mezcla de alimentación y solvente se muestran en la tabla 4-4.

Tabla 3-4: Resultados del dimensionamiento del sistema de agitación

Parámetro	Dimensión
Numero de hélices	7
Altura de hélice	1,5 cm
Altura de eje	1,15 m
Diámetro de eje	1,25 cm
Diámetro de polea conductora	5 cm
Diámetro de polea conducida	13 cm
Potencia del motor	½ hp
Voltaje del motor	110/220 v
Rpm del motor R_1	1720 rpm
Rpm de salida R_2	660,4 rpm

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

Tabla 4-4: Dimensionamiento de las estructuras

Parámetro	Dimensión
Volumen tanque 1	6,8 L
Volumen tanque 2	6,8 L
Altura de la estructura principal	1,85 m
Ancho de la estructura principal	50 cm
Altura de la estructura secundaria	1,68 m
Ancho de la estructura secundaria	50 cm
Diámetro interno de chumaceras	2,5 cm
Diámetro externo de abrazaderas	8,5 cm

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

4.2. Resultados del balance de masa del sistema de extracción

4.2.1. Resultados de fracciones en el extracto

Tabla 5-4: Fracciones másicas en el extracto

Extracto	Etanol	Agua
Teórico	0,156	0,844
Experimental	0,150	0,850

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

Los resultados experimentales obtenidos con respecto a la composición de la corriente de salida (extracto), son muy próximos a los valores teóricos. Existe una diferencia de 0,006 en la fracción de etanol que representa un porcentaje de error del 4% mientras que para la fracción de agua, la diferencia en la fracción es de 0,006 con un porcentaje de error del 0,7%, con respecto al valor

teórico proporcionado por Trujillo (2012, p. 47). En base a estos resultados se establece que el agua realizó una buena extracción mediante el arrastre del etanol hacia la corriente de salida (extracto).

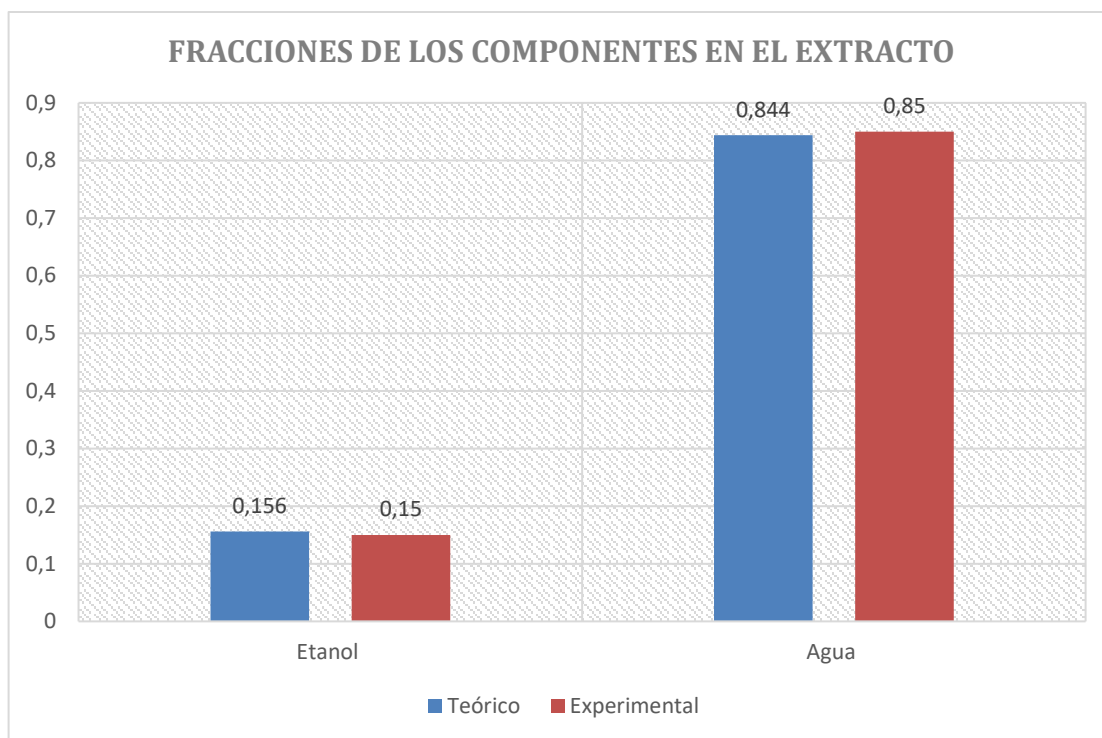


Ilustración 1-4: Fracciones máxicas de etanol y agua en el extracto.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

4.2.2. Resultado de fracciones en el refinado

Tabla 6-4: Fracciones máxicas en el refinado

Refinado	Etanol	Gasolina
Teórico	0,018	0,982
Experimental	0,120	0,880

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

Los resultados experimentales obtenidos con respecto a la composición de la corriente de salida (refinado) muestran diferencia en comparación con los valores teóricos establecidos por Trujillo (2012, p.47). Las condiciones de operación del equipo durante el proceso de extracción fueron las mismas no obstante, las propiedades de la gasolina empleada difieren de la gasolina sintética utilizada por Trujillo (2012, p.46). La calidad y composición de la gasolina empleada en este trabajo impidieron obtener un valor superior al 0,95 de su fracción máxica en el refinado sin embargo, el proceso de su purificación por extracción de etanol fue evidente, ya que se logró un aumento del 0,5 (mezcla de alimentación) al 0,88 (refinado) en su fracción máxica.

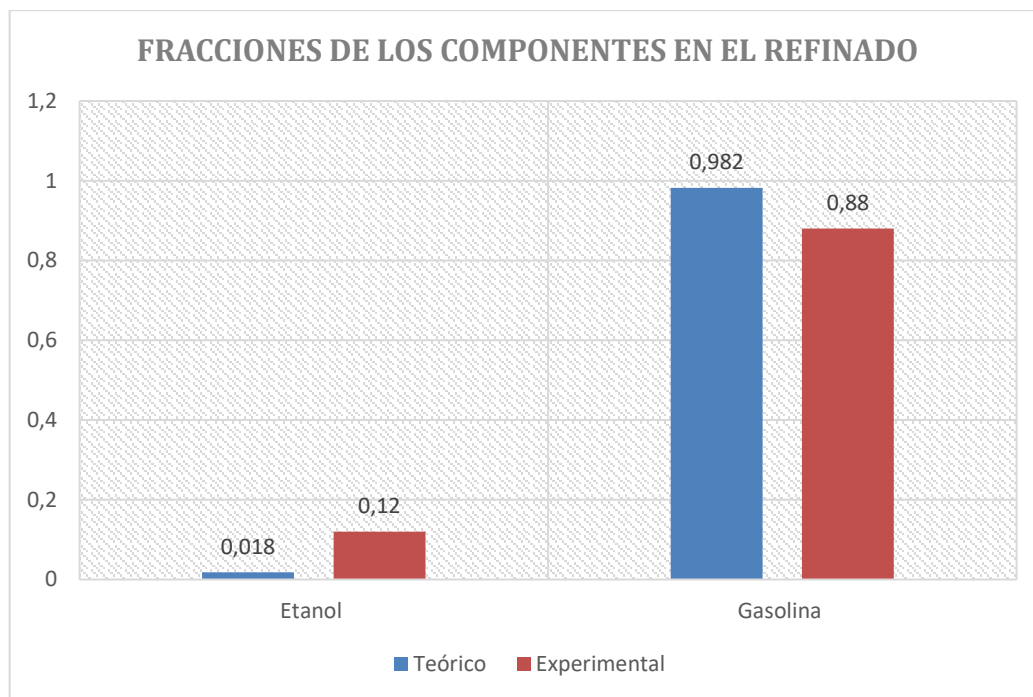


Ilustración 2-4: Fracciones másicas de etanol y gasolina en el refinado.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

4.3. Eficiencia de extracción

Tabla 7-4: Eficiencias de extracción

Eficiencia	
Teórica	98 %
Experimental	86 %

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

La eficiencia de extracción se obtuvo de la relación entre la cantidad de etanol arrastrada por el agua (extracto) y la cantidad de etanol presente en la mezcla de alimentación. La eficiencia experimental de extracción alcanzada por el equipo fue cercana a la eficiencia teórica calculada en base a los datos tomados del trabajo de Trujillo (2012, p.47). La eficiencia de extracción del 86% (tabla 7-4) es un valor que se encuentra dentro del rango de eficiencias para equipos de extracción líquida con sistema de agitación mecánica (tabla 1-2) (McCabe et al., 2007: p.810).

El sistema de agitación mecánica, característico del modelo Scheibel, contribuye a la obtención de un valor de eficiencia más elevada en comparación con la eficiencia proporcionada con otros diseños de equipos de extracción ya que la rotación de las aspas favorece la transferencia de masa entre la mezcla de alimentación y el solvente extractor, produciéndose una separación más efectiva y más rápida.

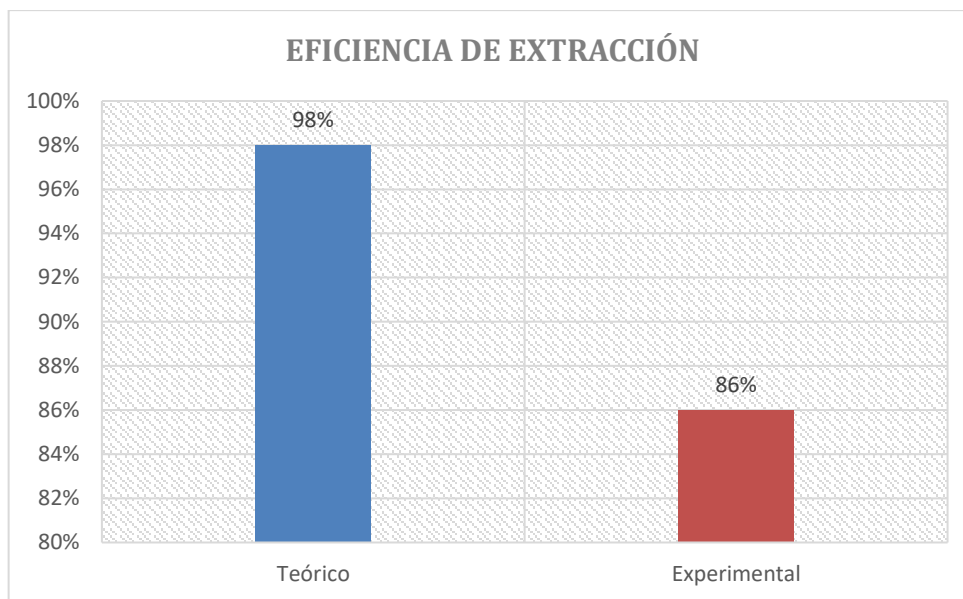


Ilustración 3-4: Eficiencia teórica y experimental de extracción.

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

4.4. Rendimiento del equipo

El rendimiento fue obtenido mediante la relación entre la masa de etanol presente en el extracto, que fue el resultado de la práctica en el laboratorio y la masa de etanol teórica en el extracto, valor que fue proporcionado por el trabajo de Trujillo (2012, p.47). El rendimiento de la columna de extracción fue del 88% y se consideró como un resultado satisfactorio porque superó el rendimiento obtenido por los autores Molina y Pacheco (2015, p.40) quienes lograron alcanzar un valor de 85% en su equipo de extracción, que fue diseñado de forma similar a la del equipo construido en el presente proyecto técnico.

4.5. Análisis financiero

El equipo columna de extracción líquido-líquido tiene un costo que se encuentra en un rango de \$8000 a \$16000 en el mercado internacional. Este tipo de equipos no están disponibles para la venta en el Ecuador por lo que es necesario realizar su importación, proceso que eleva el costo considerablemente. Entre los proveedores internacionales se tiene a *DEA System Solution*, una empresa europea que ofrece variedad de equipos para procesos químicos. En su catálogo de equipos, esta empresa presenta equipos de extracción elaborados en acero inoxidable con motores de 500 RPM; su costo depende de la capacidad en litros y los modelos van desde los \$8000 hasta los \$16000 y están diseñados para uso a nivel industrial. Otro proveedor es *Zhengzhou Tiei Extraction Technology*, una empresa china que ofrece columnas de extracción con control automático, valoradas en \$10000.

El equipo construido en este proyecto técnico está diseñado para realizar procesos de extracción a escala de laboratorio. Su valor es de \$2759 como se muestra en la tabla 6-4 y es económico en comparación con los equipos ofertados en el mercado internacional. Se emplearon materiales con propiedades adecuadas para trabajar en laboratorio como: el vidrio borosilicato 3.3, tuberías de acero inoxidable, válvulas italianas, motor WEG de ½ hp, flujómetros de panel y acero estructural ASTM A36. El tiempo de duración del equipo estimado en base a la durabilidad de los materiales en conjunto es de 10 años. Una gran ventaja que posee el equipo construido es su fácil desmontaje si se requiere cambiar los rellenos plásticos o reemplazar la columna de vidrio.

Tabla 8-4: Costo del equipo construido

Elementos del equipo	Cantidad	Valor unitario \$	Valor total \$
Columna de vidrio borosilicato 3.3	1	400	400
Motor 0,5 hp	1	250	250
Flujómetros de panel	2	150	300
Eje con hélices de acero inoxidable	1	80	80
Malla de polietileno para rellenos	8	1,50	12
Chumaceras	2	25	50
Tuberías de acero inoxidable	4	20	80
Válvulas de bola	4	10	40
Tanques de acero inoxidable	2	100	200
Pernos y tuercas	20	0,50	10
Accesorios	15	1,50	22,50
Abrazaderas	15	0,50	7,50
Pintura spray	5	3,00	15
Estructura de soporte de acero ASTM A36	1	400	400
Breiker	1	10	10
Mano de obra	1	700	700
Rótulos del equipo	2	9,50	19
Transporte del equipo			100
TOTAL			\$ 2759

Realizado por: Chuchuca, Jhon y Tobar, María, 2023.

CONCLUSIONES

-Se determinó cada uno de los parámetros ingenieriles de diseño para el dimensionamiento del equipo que fue dividido en cuatro sistemas. Para el sistema de extracción se consideró: altura, diámetro y volumen de la columna de vidrio y los rellenos. En el sistema hidráulico se estableció el diámetro para las tuberías de cada tramo. En el sistema de agitación se determinó: la velocidad de rotación del eje (rpm) y en el sistema de soporte: volumen de tanques de almacenamiento y dimensiones de las estructuras metálicas que brindan estabilidad al equipo.

-Se construyó una columna de extracción tipo *Scheibel* para sistemas ternarios, en base al diseño de ingeniería que se caracteriza por poseer un sistema de agitación mecánica el cual permite agilizar el proceso de extracción de la sustancia objetivo, con temperatura ambiente y presión atmosférica como condiciones de operación.

-Se cuantificó cada una de las diferentes concentraciones que componen las corrientes de salida: extracto y refinado en el sistema ternario gasolina-etanol-agua, donde el agua se empleó como solvente para la extracción de etanol de la mezcla binaria: gasolina-etanol. En el extracto se obtuvieron: 0,15 de etanol y 0,85 de agua mientras que en el refinado: 0,12 de etanol y 0,88 de gasolina. La eficiencia de extracción alcanzada en esta práctica fue del 86% y el rendimiento obtenido fue del 88%.

-Se redactó el manual de funcionamiento de la columna de extracción donde se describen aspectos técnicos como: sistema de encendido y apagado, tiempo de agitación, sistema de carga y descarga del equipo, limpieza y mantenimiento general; junto a las guías de prácticas de laboratorio que fueron desarrolladas de forma didáctica para una fácil comprensión de los estudiantes.

RECOMENDACIONES

-Realizar ensayos de extracción de etanol usando diferentes tipos de gasolina para la preparación de mezclas de alimentación, con la finalidad de determinar cómo influye la calidad de la gasolina empleada en la eficiencia de extracción líquido-líquido.

-Utilizar la destilación como una operación complementaria a la extracción líquido-líquido, aplicada a la corriente del extracto para la separación de etanol del agua y así obtener un producto útil que puede ser reutilizado en el laboratorio para otras prácticas.

-Utilizar la corriente de refinado como nueva corriente de alimentación para repetir el proceso de extracción, con el objetivo de obtener mejores resultados en la remoción del etanol de la gasolina, llegando a concentraciones inferiores al 5% de etanol en la corriente de refinado final.

-Realizar el precalentamiento de las sustancias que componen las corrientes de entrada del equipo, cuando el sistema con el cual se va a trabajar requiera de temperatura superior a los 20 °C, como condición de operación para la extracción líquida.

BIBLIOGRAFÍA

- ACESCO.** *Ficha Técnica Acero Recubierto Galvanizado y Pintado* [blog]. Guayaquil-Ecuador: 2022. [Consulta: 23 octubre 2022]. Disponible en : <https://www.acesco.com.co/descargas/fichastecnicas/ficha-tecnica-acero-recubierto.pdf>.
- AHLEME, A.** *Etude expérimentale et modélisation de l'effet du sel sur l'équilibre liquide-liquide des systèmes ternaires (Eau-acide acétique-solvant)* (Trabajo de titulación) (Maestría) [en línea]. Université Mohamed Khider. Biskra - Argelia. 2018. pp: 34-42. [Consulta: 15 octubre 2022]. Disponible en: http://thesis.univ-biskra.dz/3937/1/Th%C3%A8se_Doc%20en%20science_AIDAOU%281%29.pdf.
- ARCOS, N; & HANSEN, M.** Rediseño de la columna de extracción líquido-líquido y ensayo didáctico (Trabajo de Titulación) (Ingeniería Química) [en línea]. Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias. Ingeniería Química. Guayaquil-Ecuador. 2017. pp. 10-19. [Consulta: 30 septiembre 2022]. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/18752>.
- ARIAS, D; & RODRÍGUEZ, J.** Diseño y construcción de un módulo de extracción líquido-líquido para el laboratorio de operaciones unitarias de la Escuela de Tecnología Química de la Universidad Tecnológica de Pereira (Trabajo de Titulación) (Ingeniería Química) [en línea]. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnología. Tecnología Química. Pereira - Colombia. 2016. pp. 32-38. [Consulta: 30 septiembre 2022]. Disponible en: <https://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/6784/66028424R696.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- ASADOLLAHZADEH, M. et al.** “A comparison between drop size distributions derived from the probability distribution functions and maximum entropy principle. Case study; pilot plant Scheibel extraction column”. *Chemical Engineering Research and Design* [en línea], 2017, (Inglaterra) 117(18), pp. 648-658. [Consulta : 1 octubre 2022]. ISSN 02638762. Disponible en : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263876216302854>.
- ASADOLLAHZADEH, M. et al.** “Assessment of mass transfer coefficients in extraction stages of La (III) and Ce (III) ions by using rotating Scheibel column with regular packing structure”. *Separation and Purification Technology* [en línea], 2021, (Países Bajos) 274(14). [Consulta: 1 octubre 2022]. ISSN 18733794. Disponible en : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383586621008285>.

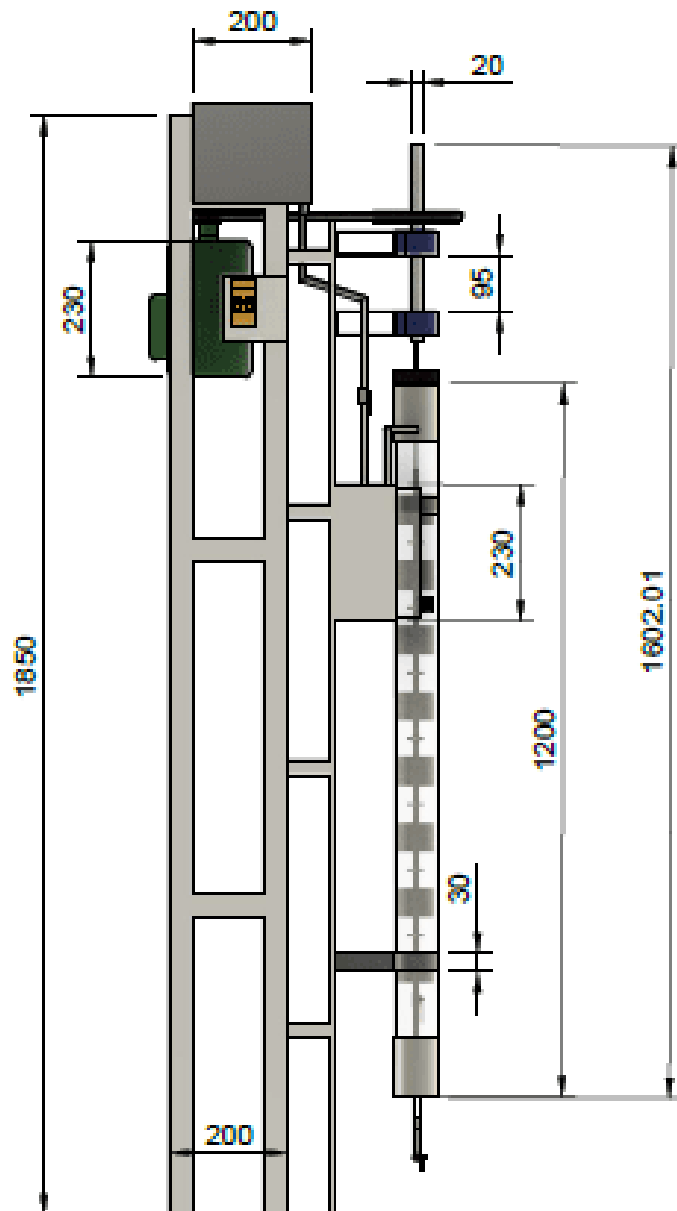
- CARBONE STAINLESS STEEL.** *Ficha técnica del acero inoxidable* [blog]. Panamá: 2022. [Consulta: 23 octubre 2022]. Disponible en: <https://www.empresacarbone.com/pdf/ficha-tecnica-del-acero-inoxidable.pdf>.
- DE DIETRICH SYSTEMS.** *Columnas de extracción* [blog]. Estados Unidos: 2022. [Consulta: 28 septiembre 2022]. Disponible en: <https://www.dedietrich.com/es/soluciones-y-productos/extraccion/extraccion-liquido/liquido/columnas-de-extraccion>.
- GALÁN, S.** *Apuntes de operaciones de separación por transferencia de materia I* [en línea]. Madrid-España: Universidad Politécnica de Madrid, 2014. [Consulta: 1 octubre 2022]. Disponible en: <https://www.cartagena99.com/recursos/fisica/apuntes/Apuntes.pdf>
- GONZÁLEZ, D; & YÁNEZ, Y.** Diseño y construcción de un extractor sólido-líquido para la obtención de aceite de semillas de sambo y zapallo (Trabajo de Titulación) (Ingeniería química) [en línea]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de Ciencias. Riobamba-Ecuador. 2012. pp. 42-45. [Consulta: 30 septiembre 2022]. Disponible en: <http://dspace.esoch.edu.ec/handle/123456789/1978>.
- HERRERO, M; & IBAÑEZ, E.** “Green extraction processes, biorefineries and sustainability: Recovery of high added-value products from natural sources”. *Journal of Supercritical Fluids* [en línea], 2018, (Países Bajos) 134(15), pp. 252-259. [Consulta: 30 septiembre 2022]. ISSN 08968446. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0896844617307325>.
- INGENIEROS CONSULTORES S. L.** *Características de tuberías* [blog]. Madrid: 2017. [Consulta: 5 octubre 2022]. Disponible en: <https://www.factor4.es/>.
- INSTITUTO AMERICANO DEL HIERRO Y DEL ACERO.** *Generalidades de las normativas para acero* [blog]. Washington D.C. : 2022. [Consulta: 8 diciembre 2022]. 2022. Disponible en: <https://www.astm.org/products-services/digital-library.html>.
- LOBATO, M.** Diseño de una columna de extracción líquido-líquido de platos perforados a escala de plan piloto (Trabajo de titulación) (Ingeniería Química) [en línea]. Universidad de Cádiz. Facultad de Ingeniería Química. Cádiz-España. 2016. pp. 33-40. [Consulta: 30 septiembre 2022]. Disponible en: <https://rodin.uca.es/handle/10498/18568>.
- MARCILLA, A; et al.** *Introducción a las operaciones de separación: cálculo por etapas de equilibrio* [en línea]. Murcia-España: Universidad de Alicante, 2018. [Consulta: 1 octubre 2022]. Disponible en: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/4329>
- MCCABE, W; et al.** *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 7^a ed. México: McGraw-Hill, 2007, ISBN 0-07-284823-5, pp. 808-826.
- MOLINA, J; & PACHECO, F.** Diseño y construcción de un extractor líquido-líquido para un sistema ternario (Trabajo de titulación) (Ingeniería Química) [en línea]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de Ciencias. Ingeniería Química. Riobamba -

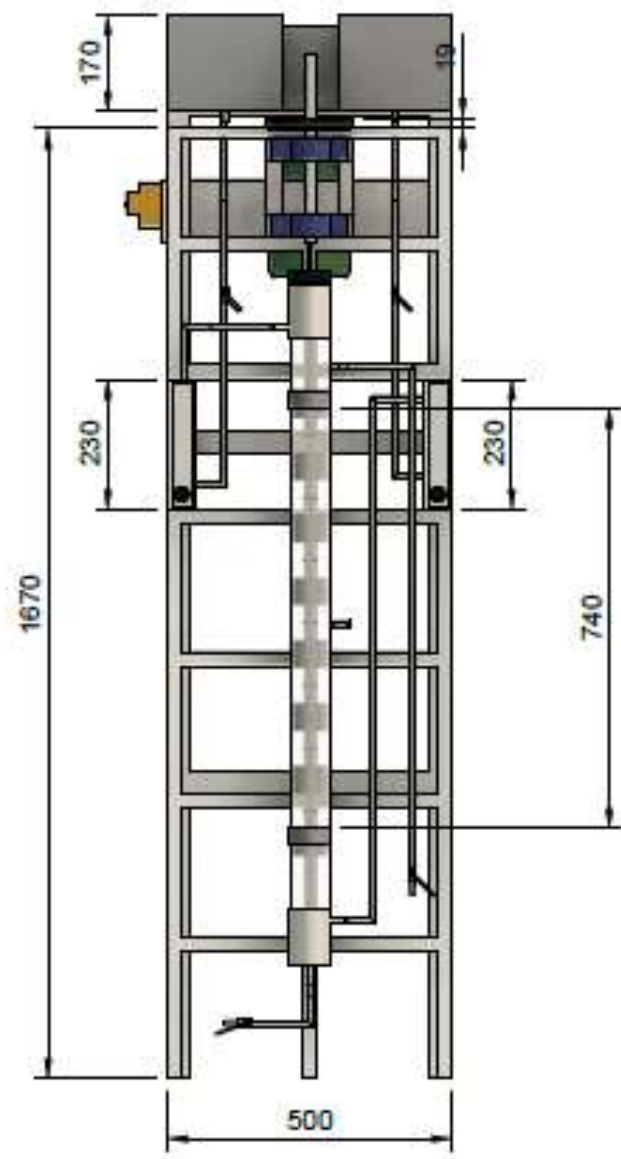
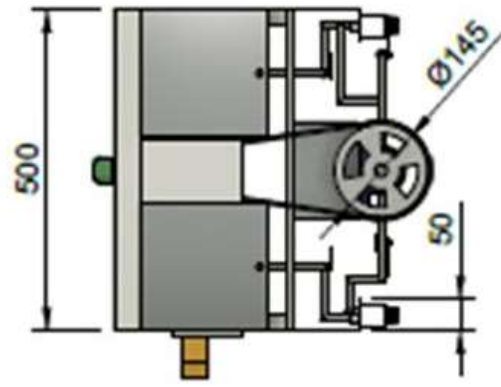
- Ecuador. 2015. pp. 173-192. [Consulta: 30 septiembre 2022]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4737>.
- OCÓN, J; & TOJO, G.** *Problemas de ingeniería química. Operaciones básicas*. Madrid: Aguilar S.A., 1980, ISBN 8403202202, pp. 111-200.
- OLLERO, P.** *Fundamentos de las operaciones de separación de transferencia de masa* [en línea]. Sevilla-España: Universidad de Sevilla. 2022. [Consulta: 1 octubre 2022]. Disponible en: <https://editorial.us.es/es/muestra/720105?f=pdf>
- PERRY, R.** *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 9^a ed. New York : McGraw-Hill, 2019, ISBN 978-0-07-183408-7, pp. 1449-1494.
- SANTOS, T ; et al.** “Liquid-liquid equilibrium for ternary system containing biodiesel, methanol and water. *Journal of Environmental Chemical Engineering* [en línea], 2018, (Inglaterra) 6(1) pp. 984-990. ISSN 22133437. Disponible en : <https://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/8075?locale=en>
- SCHMIDT, A ; & STRUBE, J.** “Distinct and quantitative validation method for predictive process modeling with examples of liquid-liquid extraction processes of complex feed mixtures”. *Processes* [en línea], 2019, (Suiza) 7(5), pp. 20-25. [Consulta: 30 septiembre 2022]. ISSN 22279717. Disponible en: <https://www.mdpi.com/465084>.
- SHAKIB, B; et al.** “Reactive extraction of zinc ions in the Scheibel column; A case study by applying the mathematical modelling of mass transfer with forward mixing”. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification* [en línea], 2021, (Países bajos) 169(15), pp 23-30. [Consulta: 1 octubre 2022]. ISSN 02552701. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0255270121003019>.
- SOCIEDAD AMERICANA DE INGENIEROS MECÁNICOS.** *Normas y certificación ASME* [blog]. Nueva York: 2022. [Consulta: 8 diciembre 2022]. Disponible en: <http://www.asme.org/about-asme>.
- SOCIEDAD ESTADOUNIDENSE PARA PRUEBAS Y MATERIALES.** *Normativa ASTM y generalidades*. [blog]. Pensilvania: 2022. [Consulta: 8 diciembre 2022]. Disponible en: <https://www.astm.org/products-services/digital-library.html>.
- SUMINISTROS TÉCNICOS S.A.** *Acero estructural ASTM A36* [blog]. Ecuador: 2022. [Consulta: 23 octubre 2022]. Disponible en: <http://www.sumiteccr.com/acero/estructural/AE01.pdf>.
- TAFOYA, N.** Propuesta de una práctica de extracción líquida en una etapa para el laboratorio de introducción a los procesos de separación (Trabajo de titulación) (Maestría) [en línea]. Instituto Politécnico Nacional de México. Facultad de Ciencias. Ingeniería Química. Ciudad de México - México. 2014. pp. 18-49. [Consulta: 28 septiembre 2022]. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/17336/1/25-1-16726.pdf>.

- TREYBAL, R.** *Operaciones de transferencia*. 3^a ed. México: McGraw-Hill, 1998, ISBN 9789686046342, pp. 447-600.
- TRUJILLO, R.** Determinación de la solubilidad de Etanol Anhidro y Etanol Acuoso en gasolina sintética y refinada y la tolerancia de agua a 298,15 K, 308,15 K, 318,15 K. (Trabajo de titulación) (Maestría) [en línea]. Universidad de las Américas. Puebla - México. 2012. pp. 38-50. [Consulta: 30 septiembre 2022]. Disponible en: <https://studylib.es/doc/4858653/determinacion-de-la-solubilidad-de-etanol-anhidro-y-etano...>
- WEBER, B ; et al.** “Performance Map for the Design of Liquid-Liquid Extraction Columns”. *Chemie-Ingenieur-Technik* [en línea], 2019, (Alemania) 91(11), pp. 1674-1680. [Consulta: 30 septiembre 2022]. ISSN 15222640. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/cite.201900057>.
- WEERANOPPANANT, N ; et al.** “Design of Multistage Counter-Current Liquid-Liquid Extraction for Small-Scale Applications”. *Industrial and Engineering Chemistry Research* [en línea], 2017, (Estados Unidos) 56(14), pp. 4095-4103. [Consulta: 30 septiembre 2022]. ISSN 15205045. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.iecr.7b00434>.

ANEXOS

ANEXO D: PLANO DEL EQUIPO CONSTRUIDO





ANEXO E: MANUAL DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

**MANUAL DE OPERACIÓN DE LA COLUMNA DE EXTRACCIÓN
LÍQUIDO-LÍQUIDO**



REALIZADO POR:

MARIA JOSE TOBAR HEREDIA
JHON ANIBAL CHUCHUCA LEÓN

INTRODUCCIÓN

La columna de extracción diseñada y construida para ser implementada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias, tiene como objetivo realizar la separación de una sustancia específica presente en una mezcla de alimentación, a través del uso de un solvente adecuado. El proceso de extracción se agiliza gracias al sistema de agitación mecánica incorporado, que favorece la transferencia de masa. La extracción como operación unitaria se fundamenta en la diferencia de densidades y solubilidades del solvente empleado con respecto a las sustancias que componen la mezcla de alimentación.

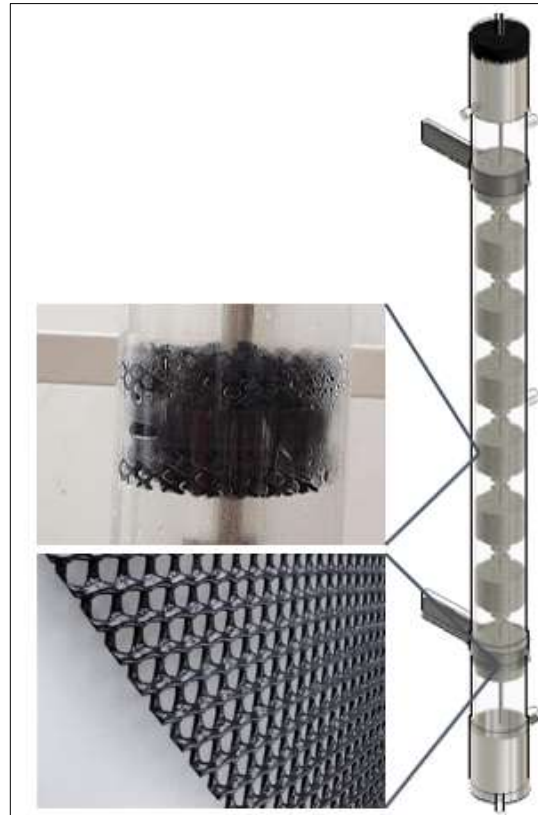
Las variables de operación del equipo son: temperatura y presión. La columna de extracción opera de forma adiabática, a temperatura ambiente (20 °C) y presión atmosférica (72 atm) de la ciudad de Riobamba. El equipo fue dimensionado a escala de laboratorio y los materiales utilizados en su construcción como el vidrio borosilicato 3.3 y el acero inoxidable en tuberías, lo hacen idóneo para realizar prácticas de laboratorio. Entre las ventajas del equipo se tiene: facilidad para su desmontaje, operación sencilla de válvulas, sistema simple de encendido/apagado y condiciones seguras de operación.

El equipo está conformado por cuatro sistemas. El sistema de soporte tiene una estructura principal para albergar los dos tanques de alimentación y el motor, y la estructura secundaria que da soporte a la columna de vidrio y sistema hidráulico. El sistema de agitación comprende el motor y un eje de acero inoxidable localizado dentro de la columna de vidrio. El sistema de extracción que comprende la columna de vidrio y un conjunto de ocho rellenos de malla de polietileno. Finalmente, el sistema hidráulico que presenta tuberías de acero inoxidable con válvulas manuales y dos flujómetros que permiten controlar la velocidad de llenado de la columna.

DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA COLUMNA DE EXTRACCIÓN

SISTEMA DE EXTRACCIÓN

Compuesto por una columna de vidrio borosilicato 3.3 y ocho rellenos fabricados de mallas de polietileno de alta densidad. La columna de vidrio posee cuatro orificios a manera de picos extendidos, dos en la parte superior de las cuales la izquierda es para ingreso de solvente y el derecho es para salida del refinado. La parte inferior central de la columna presenta una salida para el extracto y un ingreso a la derecha para la mezcla de alimentación. El llenado de la columna se realiza a contracorriente. La salida ubicada en la parte media de la columna sirve para ingreso de aire luego del lavado de la columna.

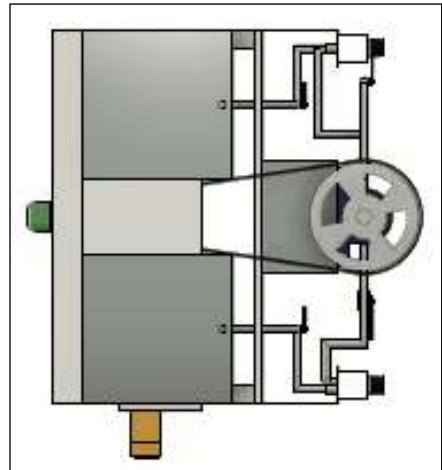


PRECAUCIONES

- No exponer la columna de vidrio a golpes o sobrecargas.
- No utilizar grasas, ceras o aceites como sustancias de alimentación ya que pueden degradar los rellenos y causar su hinchamiento.
- No utilizar sustancias como hidrocarburos aromáticos, ácidos fuertes y bases fuertes como sustancias de alimentación a la columna de extracción porque pueden degradar los rellenos.
- Verificar que la salida ubicada en la parte media derecha de la columna esté cubierta antes de iniciar el llenado y operación del equipo.

SISTEMA DE AGITACIÓN

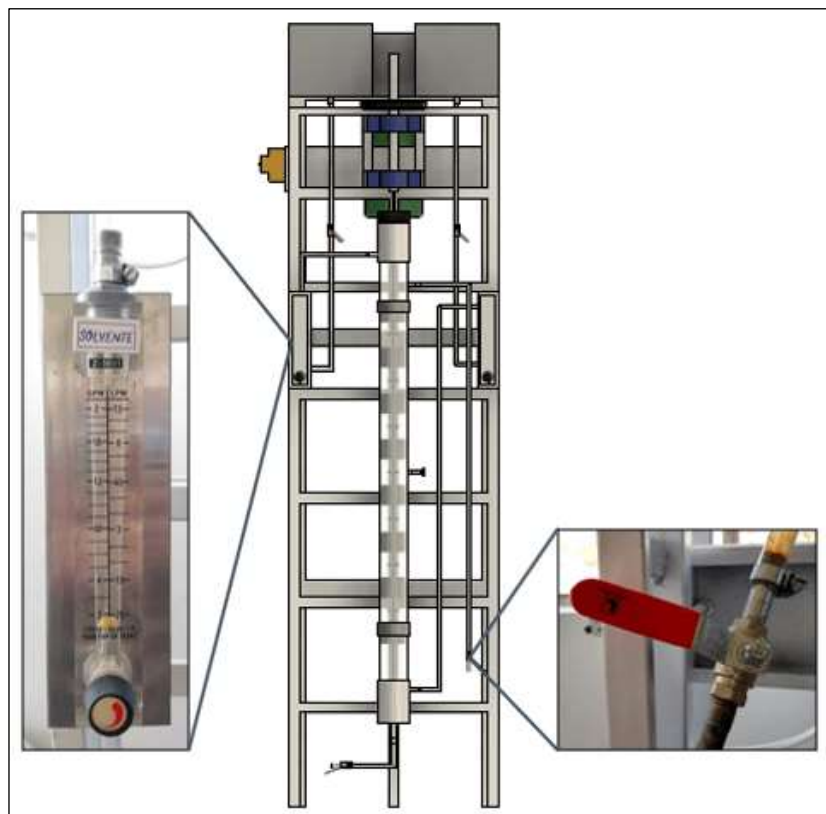
Consiste en un eje central de acero inoxidable con aspas incorporadas, soportado por dos chumaceras. El eje realiza movimiento de rotación dentro de la columna de vidrio para realizar la mezcla de las sustancias líquidas que son alimentadas a la columna de extracción. El equipo posee dos poleas una conductora y otra conducida que permiten reducir el número de revoluciones producidas por el motor de 1720 a 660 rpm. El motor posee una potencia de 0,5 HP,



PRECAUCIONES

- Tener cuidado con la rotación de la polea ubicada en la parte superior de la columna (ver imagen, vista superior del equipo) cuando el equipo está encendido.
- Se debe observar el equipo en operación a 1 m de distancia.

SISTEMA HIDRÁULICO



Este sistema posee dos flujómetros que permiten regular la velocidad de llenado de la columna. El flujómetro izquierdo regula el caudal del solvente mientras que el flujómetro derecho regula el caudal de la mezcla de alimentación. Ambos flujómetros se abren a la izquierda y pueden ser regulados desde 0,2 GPM (0,75 L/min) hasta 2 GPM (7,5 L/min). Para regular los flujómetros se debe colocar la visión al mismo nivel que la escala graduada de lo contrario se cometerán errores en la graduación por apertura de las perillas.

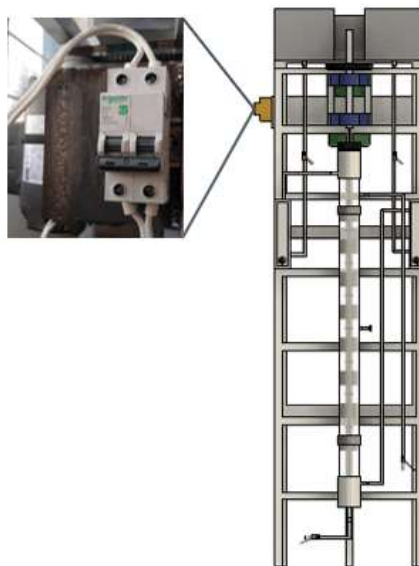
Las válvulas están cerradas cuando se encuentran paralelas a las tuberías donde se encuentran mientras que están abiertas cuando se encuentran perpendiculares a las tuberías respectivas a cada válvula. La imagen muestra una válvula cerrada, para su apertura, se debe realizar su rotación hacia abajo para abrirla.

PRECAUCIONES

- Realizar la apertura y cierre de válvulas de forma cuidadosa.
- Realizar lavado de los caudalímetros si se observan partículas dentro de los mismos.

ENCENDIDO Y APAGADO DEL EQUIPO

El encendido se realiza en el braker, ubicado en la parte izquierda superior del equipo como se muestra en la imagen. Para encender el equipo, el braker debe estar hacia arriba y para apagarlo hacia abajo. La conexión del equipo se debe realizar a 110 V.



SISTEMA DE SOPORTE DEL EQUIPO

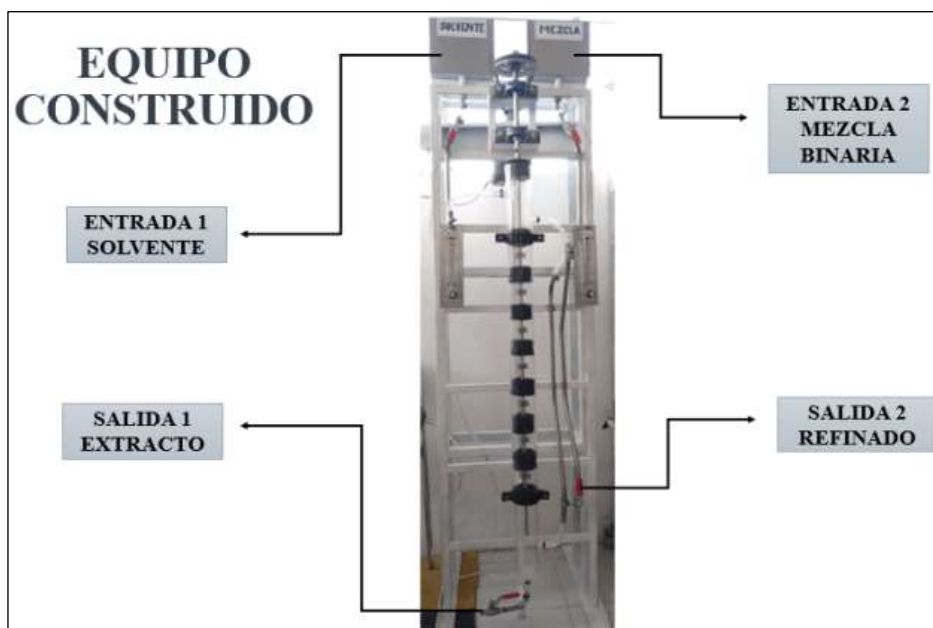
Estructura principal

Elaborada en acero estructural A36. Brinda soporte a los dos tanques de alimentación del equipo y al motor.

Estructura secundaria

Elaborada en acero estructural A36. Brinda soporte a las tuberías, chumaceras, columna de vidrio y flujómetros.

ENTRADAS Y SALIDAS DEL EQUIPO



PRECAUCIONES PARA MANIPULACIÓN DEL EQUIPO

- Los tanques de alimentación poseen una capacidad de 6,8 litros cada uno. Para la alimentación no se debe exceder la cantidad de 5 L por tanque, para evitar que los líquidos salpiquen durante la agitación.
- El llenado de la columna se debe realizar con el equipo apagado y las válvulas cerradas.

- Los flujómetros deben ser ajustados y controlados durante el proceso de llenado de la columna, verificando que el indicador se encuentre en la posición adecuada de velocidad de llenado.
- No llenar la columna más allá del primer relleno en la parte superior.
- Una vez terminado el llenado de la columna, se deben cerrar los flujómetros y todas las válvulas.
- No encender el equipo si no se ha finalizado el llenado.
- No exceder los 2 minutos de agitación y encendido del equipo.
- Trabajar en área ventilada.

LIMPIEZA DEL EQUIPO

Para realizar la limpieza del equipo se deben seguir los siguientes pasos:

- Disolver 6 ml de jabón líquido para platos (con propiedad desengrasante) en 6 litros de agua.
- Verificar que el equipo se encuentre apagado y con todas sus válvulas cerradas.
- Llenar los tanques de alimentación con agua y jabón mezclados.
- Realizar el llenado de la columna hasta el primer relleno de la parte superior.
- Encender el equipo y realizar agitación durante 1 minuto.
- Apagar el equipo.
- Colorar recipientes debajo de las salidas de extracto y refinado.
- Realizar la descarga del equipo mediante la apertura de las válvulas de extracto y refinado.
- Repetir el proceso con agua purificada hasta observar que las paredes de la columna de vidrio estén totalmente limpias.
- Se recomienda realizar mínimo 3 lavadas del equipo.
- No utilizar agua de la llave del laboratorio para los últimos enjuagues debido a que los minerales se acumulan en los flujómetros y pueden obstruirlos.
- Retirar el tapón de la salida derecha en la parte central de la columna para que ingrese el aire y se realice secado de la columna durante 24 horas.
- Volver a colocar el tapón luego del secado de la columna.

MANTENIMIENTO DEL EQUIPO

- Revisar que los flujómetros no estén llenos de partículas indeseadas, de lo contrario se debe realizar lavado del equipo con agua purificada.
- Revisar periódicamente los tanques de alimentación y las salidas del equipo y si existen capas de óxido utilizar una franela humedecida con DESOXIQUIM (producto desoxidante) para limpieza de las superficies metálicas.

- Verificar que no existan filtraciones de líquido en las conexiones con la columna de vidrio, de lo contrario usar silicón para pega de vidrios y reforzar las uniones de las mangueras con los picos de la columna de vidrio.

ANEXO F: GUÍA PARA PRÁCTICA DE LABORATORIO

PRÁCTICA DE PURIFICACIÓN DE GASOLINA POR EXTRACCIÓN LÍQUIDA

1. Objetivos:

1.1. General:

Realizar la extracción de etanol presente en gasolina a través del uso de agua como solvente

1.2. Específicos:

2. Marco teórico referencial:

2.1. Marco Teórico:

Extracción líquido-líquido

Es una operación unitaria que involucra la transferencia de masa para la separación de una determinada sustancia, presente en una mezcla en fase líquida y homogénea con ayuda de un solvente adecuado. También conocida como extracción con solvente, se fundamenta en la diferencia de solubilidad del soluto con una de las sustancias presentes en la mezcla, que contiene la sustancia de interés (Treybal, 1998, p.527).

Mezcla de alimentación

Esta mezcla en fase líquida ingresa al equipo de extracción y contiene la sustancia a extraer, denominada soluto. Las sustancias que componen esta mezcla son miscibles entre sí y forman una sola fase homogénea (Treybal, 1998, p.527).

Solvente

Es la sustancia en estado líquido que se utiliza para separar uno de los componentes de la mezcla de alimentación y que posee contacto directo con ella (Treybal, 1998, p.527).

Extracto

Es la salida rica en solvente y la sustancia que ha sido separada durante el proceso de extracción (McCabe et al., 2007: p.809).

Refinado

Es otra corriente de salida compuesta por la o las sustancias que componen la mezcla de alimentación y que se han logrado separar del soluto (sustancia extraída de la mezcla). Esta corriente es pobre en solvente (McCabe et al., 2007: p.809).

2.2. Marco referencial:

La práctica de “**PURIFICACIÓN DE GASOLINA POR EXTRACCIÓN LÍQUIDA**” se llevó a cabo el día__ del__ en el laboratorio de Operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias de la Escuela de Ingeniería Química ubicada en la ESPOCH en la ciudad de Riobamba, ubicada en la panamericana Sur Km ½ cuyas coordenadas son 78°40'20” y una altura de 2815 msnm.

3. Parte experimental:

3.1. Sustancias y reactivos:

- Agua purificada
- Gasolina (extra)
- Etanol Anhidro

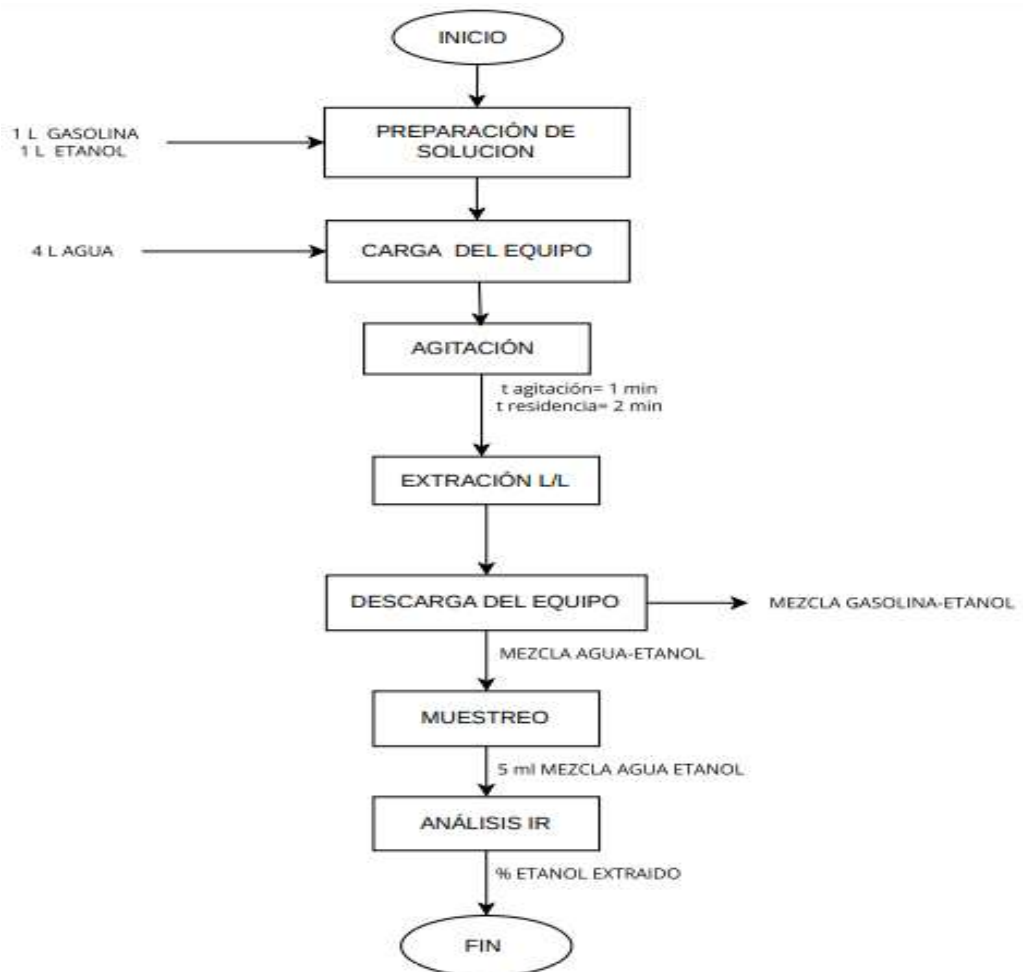
3.2. Materiales y equipos:

- 2 probetas de 500 ml
- 2 tubos de ensayo y gradilla
- 2 micropipetas
- 1 varilla de agitación
- 2 envases de plástico pequeños
- Columna de extracción L/L
- Refractómetro

3.3. Procedimiento y diagrama de flujo:

- Preparar 2 L de solución de gasolina-etanol con la proporción 50% v/v.
- Medir un volumen de 4 L de agua purificada.
- Verificar que todas las válvulas del equipo estén cerradas (perpendiculares a las tuberías).
- Cargar los tanques de almacenamiento con el agua como solvente y la solución de etanol-gasolina como mezcla.
- Realizar el llenado de la columna con la apertura de las válvulas superiores y la regulación del caudal en los flujómetros en una relación 2:1 de solvente-mezcla (el llenado máximo de la columna no debe exceder el 90% de su volumen total).
- Cerrar los flujómetros y las válvulas superiores.

- Conectar el equipo y encender el sistema de agitación durante 1 min.
- Esperar durante 2 minutos hasta que el sistema se estabilice previo al proceso de descarga.
- Abrir las llaves de salida y tomar muestras de extracto (base de la columna de vidrio) y refinado (salida de la parte superior de la columna).
- Llevar las muestras al refractómetro para el análisis IR y registrar valores.
- Realizar cálculos de balance de masa y determinar la eficiencia de extracción (utilizar tablas adjuntas).



4. Datos:

4.1. Datos experimentales:

Tabla 1: Cantidades de alimentación a la columna de extracción

Componente	Volumen (L)
Mezcla (etanol-gasolina)	1
Solvente (agua)	2

Tabla 2: Densidades de las sustancias del proceso de extracción

Sustancia	Densidad (Kg/m^3) a 20 °C
Agua (solvente extractor)	1000
Gasolina (solvente portador)	720
Etanol (soluto)	790

Tabla 3: Índice de refracción de las soluciones (agua-etanol) a temperatura ambiente

Concentración nominal % m/m etanol en agua	Índice de refracción			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
100	1,36398	1,36388	1,36398	1,36395
90	1,36496	1,36497	1,36469	1,36487
80	1,36318	1,36316	1,36312	1,36315
70	1,36014	1,36014	1,36015	1,36014
60	1,35678	1,35679	1,35679	1,35679
50	1,35764	1,35764	1,35762	1,35763
40	1,35284	1,35287	1,35290	1,35287
30	1,34791	1,34791	1,34790	1,34791
20	1,34266	1,34267	1,34268	1,34267
10	1,33778	1,33777	1,33780	1,33778
0	1,33299	1,33299	1,33298	1,33299

5. Cálculos y Resultados:

5.1. Datos Adicionales

Tabla 4: Datos adicionales de volumen

Volumen real de la columna L	Volumen disponible (90%) L
3,449	3

5.2. Cálculos Específicos:

5.2.1. Densidad de la mezcla

$$\rho_F = \rho_G X_G + \rho_E X_E \quad (1)$$

Donde:

ρ_F = Densidad de la mezcla de alimentación, Kg/m^3

ρ_G = Densidad de la gasolina, Kg/m^3

X_G = Fracción de la gasolina en la mezcla

ρ_E = Densidad del etanol, Kg/m^3

X_E = Fracción del etanol en la mezcla

$$\rho_F = 720 * (0,50) + 790 * (0,50)$$

$$\rho_F = 755 \text{ Kg}/m^3$$

5.2.2. Masa de la mezcla

$$m_F = \rho_F * V_F \quad (2)$$

Donde:

ρ_F = Densidad de la mezcla de alimentación

m_F = Masa de la mezcla de alimentación

V_F = Volumen de la mezcla de alimentación

$$m_F = 755 * 0,001$$

$$m_F = 0,755 \text{ Kg}$$

5.2.3. Masa de etanol en la mezcla

$$m_{EF} = m_F * X_{EF} \quad (3)$$

Donde:

m_{EF} = Masa de etanol en la mezcla de alimentación

m_F = Masa de la mezcla de alimentación

X_{EF} = Fracción de etanol en la mezcla de alimentación

$$m_{EF} = 0,755 * 0,5$$

$$m_{EF} = 0,377 \text{ Kg}$$

5.2.4. Masa de gasolina en la mezcla

$$m_{GF} = m_F * X_{GF} \quad (4)$$

Donde:

m_{GF} = Masa de gasolina en la mezcla de alimentación

m_F = Masa de la mezcla de alimentación

X_E = Fracción de gasolina en la mezcla de alimentación

$$m_{GF} = 0,755 * 0,5$$

$$m_{GF} = 0,377 \text{ Kg}$$

5.2.5. Masa de solvente

$$m_A = \rho_A * V_A \quad (5)$$

Donde:

ρ_A = Densidad del solvente

m_A = Masa del solvente

V_A = Volumen del solvente

$$m_A = 1000 * 0,002$$

$$m_A = 2 \text{ Kg}$$

5.2.6. Concentración de etanol en el extracto

Usando el refractómetro se tiene la medida del índice de refracción en el extracto.

$$IR_E = 1.3436$$

Interpolando en la tabla 3 se obtiene la concentración de:

$$\% E_E = 15\%$$

5.2.7. Fracción de etanol en el extracto

$$X_{E_E} = 0,15$$

5.2.8. Concentración del agua en el extracto

$$\% A_E = 85\%$$

5.2.9. Fracción de agua en el extracto

$$X_{A_E} = 0,85$$

5.2.10. Masa de agua extracto

$$m_{A_E} = m_A \quad (6)$$

Donde:

m_{A_E} = Masa de agua en el extracto

m_A = Masa de agua en el solvente

$$m_{A_E} = 2 \text{ Kg}$$

5.2.11. Masa del etanol en el extracto

$$\% E_E = \frac{m_{E_E}}{m_{A_E} + m_{E_E}} * 100 \quad (7)$$

Donde:

$\% E_E$ = Porcentaje de masa de etanol en el extracto

m_{E_E} = Masa de etanol en el extracto

m_{A_E} = Masa de agua en el extracto

$$15 = \frac{m_{E_E}}{m_{A_E} + 2} * 100$$

$$m_{E_E} = 0,325 \text{ Kg}$$

5.2.12. Masa de gasolina en el refinado

$$m_{G_R} = m_{G_F} \quad (8)$$

Donde:

m_{G_R} = Masa de gasolina en el refinado

m_{G_F} = Masa de gasolina en la mezcla de alimentación

$$m_{G_R} = 0,377 \text{ Kg}$$

5.2.13. Masa de etanol en el refinado

$$m_{E_R} = m_{E_F} - m_{E_E} \quad (9)$$

Donde:

m_{E_R} = Masa de etanol en el refinado

m_{E_F} = Masa de etanol en la mezcla de alimentación

m_{E_E} = Masa de etanol en el extracto

$$m_{E_R} = 0,377 - 0,325$$

$$m_{E_R} = 0,052 \text{ Kg}$$

5.2.14. Fracción del etanol en el refinado

$$X_{ER} = \frac{m_{E_R}}{m_{E_R} + m_{G_R}} \quad (10)$$

Donde:

X_{ER} = Fracción de etanol en el refinado

m_{ER} = Masa de etanol en el refinado

m_{GR} = Masa de gasolina en el refinado

$$X_{ER} = \frac{0,052}{0,052 + 0,377}$$

$$X_{ER} = 0,12$$

5.2.15. *Concentración del etanol en el refinado*

$$\% E_R = 12\%$$

5.2.16. *Fracción de la gasolina en el refinado*

$$X_{GR} = 1 - X_{ER} \quad (11)$$

Donde:

X_{GR} = Fracción de gasolina en el refinado

X_{ER} = Fracción de etanol en el refinado

$$X_{GR} = 1 - 0,12$$

$$X_{GR} = 0,88$$

5.2.17. *Concentración de gasolina en el refinado*

$$\% G_R = 88\%$$

5.2.18. *Eficiencia experimental de extracción*

$$\eta = \frac{m_{EE}}{m_{EF}} * 100 \quad (12)$$

Donde:

η = Eficiencia de extracción

m_{EE} = Masa de etanol en el extracto

m_{EF} = Masa de etanol en la mezcla

$$\eta = \frac{0,325}{0,377} * 100$$

$$\eta = 86 \%$$

5.3. Resultados:

Tabla 5: Resultados del balance de masa para el sistema de extracción

Corriente	Fracción Etanol	Etanol (Kg)	Fracción Agua	Agua (Kg)	Fracción Gasolina	Gasolina (Kg)	Eficiencia de extracción (η)
Mezcla	0,50	0,377	---	---	0,50	0,377	86 %
Solvente	---	---	1,00	2,00	---	---	
Extracto	0,15	0,325	0,85	2,00	---	---	
Refinado	0,12	0,052	---	---	0,88	0,377	

6. Errores:

6.1. Sistemáticos:

6.2. Aleatorios:

7. Discusión:

8. Conclusiones y recomendaciones:

8.1. Conclusiones:

8.2. Recomendaciones:

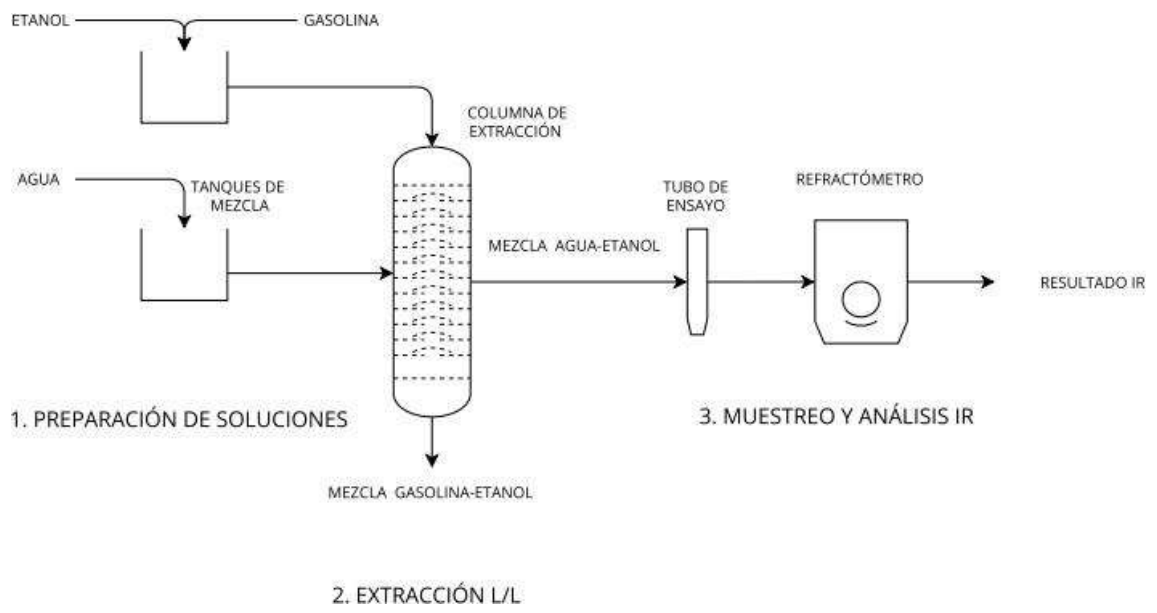
9. Referencias bibliográficas:

10. Cuestionario:

- Consulte a cerca de la aplicación de la extracción líquida en la recuperación de uranio
- Cuáles son los métodos de extracción y las características principales de cada uno

11. Anexos

12. Esquema del proceso de extracción





esPOCH

Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje

**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL**

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 05 / 05 / 2023

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: María José Tobar Heredia Jhon Anibal Chuchuca León
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería Química
Título a optar: Ingeniero/a Químico/a
Analista de Biblioteca responsable: Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo

0705-DBRA-UPT-2023