

**DESARROLLO DE UN MANUAL DE OPERACIÓN PARA EL CENTRO DE  
PURIFICACIÓN Y REFINACIÓN DEL CENTRO DE PROCESOS E INNOVACIÓN  
(CEPIIS) DE LA UNIVERSIDAD DE AMÉRICA**

**JOAN ANDREY BOLAÑOS CRUZ**

**Proyecto integral de grado para optar por el título de**

**INGENIERO QUÍMICO**

**Director**

**M. Sc Iván Ramírez Marín.**

**Codirector**

**M. Sc Luis Alberto Figueroa**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**BOGOTÁ D.C**

**2023**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

**Firma del director**

---

**Firma del presidente jurado**

---

**Nombre**

**Firma del Jurado**

---

**Nombre**

**Firma del Jurado**

**Bogotá, enero de 2023**

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA PEÑA

Consejero Institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. ALEXANDRA MEJIA GARZON

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretario General

Dr. JOSE LUIS MACIAS RODRIGUEZ

Decana Facultad de Ingenierías

Dra. NALINY PATRICIA GUERRA PRIETO

Director(a) de Ingeniería Química

Ing. NUBIA LILIANA BECERRA OSPINA

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi mamá **Flor Cruz**  
por apoyarme en todas mis locuras y  
siempre buscar mi felicidad, te quiero ma.

A mi papá **Henry Bolaños** por enseñarme que,  
a pesar de todas las dificultades, lo único que se  
puede hacer es continuar con la cabeza en alto.

A mis hermanas **Gabriela** y **Juliana** por el apoyo,  
por las peleas y por ayudarme con mis trabajos.

A mi abuelita **Isabelina Baracaldo**  
por ser mi apoyo incondicional y  
siempre esperar lo mejor de mí.

A mis tíos **Juan** y **Motas**  
por confiar en mí en todo momento,  
por enseñarme el valor del trabajo propio  
y los sacrificios que este conlleva.

**Realizando este proyecto comprendo el trabajo,  
tiempo y esfuerzo que ustedes gastaron en mí,  
para convertirme en un profesional. Gracias**

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la universidad de América por permitirme estudiar la carrera de mis sueños.

A los ingenieros **Juan Cely, Iván Ramírez y Luis Figueroa** por creer en mí e incluirme en el proyecto CEPIIS.

A mi familia que siempre me presionó para graduarme, me cobijo en todo momento y simplemente por ser la mejor familia.

A los topos **Cristian, Alejandro, Tacha, Ofid, Cesar, Jordi, Costa, Flórez, Hena, Toro y Brandon** por las noches de halo 2, las borracheras, el bullying y por enseñarme que los amigos existen.

A **Paula ortega** por enseñarme a amar el voleibol, por los abrazos, por las papitas, por escucharme, por mostrarme que tengo sentimientos, por ser mi amiga y por ser una parte importante en mi vida. Gracias

Por último, a **Andrea tirado**, mi mejor amiga, que me acompañó en los mejores y peores momentos de esta carrera, por soportar mis crisis existenciales, por motivarme a ser mejor y mantenerla.

Gracias por llegar a mi vida.

**Les agradezco a todos por acompañarme en este sueño, pues este sueño no es solo mío, también les pertenece.**

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
<b>RESUMEN</b>	13
<b>OBJETIVOS</b>	14
<b>INTRODUCCIÓN</b>	15
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	17
1.1. Secado	17
1.1.1. <i>Importancia del secado</i>	17
1.1.2. <i>Contenido de Humedad</i>	18
1.1.3. <i>Operaciones de secado</i>	20
1.1.4. <i>Clasificación de secadores</i>	20
1.1.5. <i>Factores que influyen en el proceso de secado</i>	21
1.1.6. <i>Comportamiento General del Secado</i>	22
1.2. Extracción sólido – líquido	24
1.2.1. <i>Procesos de lixiviación</i>	25
1.2.2. <i>Aplicaciones de la extracción sólido – líquido en la industria</i>	26
1.2.3. <i>Proceso de extracción sólido – líquido</i>	28
1.2.4. <i>Variables que influyen en la extracción sólido – líquido</i>	28
1.3. Extracción líquido – líquido	30
1.3.1. <i>Descripción del proceso de extracción líquido – líquido</i>	31
1.3.2. <i>Requisitos del disolvente</i>	32
1.3.3. <i>Cuando utilizar el proceso de extracción</i>	32
1.3.4. <i>Características del disolvente de extracción</i>	32
1.4. Absorción	33
1.4.1. <i>Elección del disolvente para la absorción</i>	34
1.4.2. <i>Generalidades del proceso de absorción</i>	34
1.5. Destilación	36
1.5.1. <i>Destilación simple</i>	37
1.5.2. <i>Destilación continua</i>	37
1.5.3. <i>Destilación batch</i>	37
1.5.4. <i>Destilación extractiva</i>	38
1.5.5. <i>Destilación azeotrópica</i>	39
1.5.6. <i>Aplicaciones</i>	39

1.6. Seguridad de procesos	40
1.6.1. <i>What if</i>	41
1.6.2. <i>Hazop</i>	42
1.6.3. <i>Bow-tie</i>	43
1.7. RESPEL	43
<b>2. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS</b>	<b>44</b>
2.1. Secador de bandejas	44
2.1.1. <i>Diagrama BFD del proceso de secado</i>	47
2.1.2. <i>Diagrama PFD del proceso de secado</i>	48
2.1.3. <i>Diagrama P&amp;D del proceso de secado</i>	49
2.1.4. <i>Tabla de parámetros y variables secador de bandejas</i>	50
2.1.5. <i>Caracterización del equipo</i>	51
2.2. Planta de extracción sólido-líquido y líquido-líquido	53
2.2.1. <i>Diagramas extracción solido - liquido</i>	57
2.2.2. <i>Diagramas extracción liquido-liquido</i>	60
2.2.3. <i>Tabla de parámetros y variables extracción sólido-líquido y líquido-líquido</i>	63
2.2.4. <i>Caracterización del equipo recomendada</i>	64
2.3. Planta de absorción de gases	65
2.3.1. <i>Diagrama de BFD del proceso de absorción</i>	69
2.3.2. <i>Diagrama PFD del proceso de absorción</i>	70
2.3.3. <i>Diagrama P&amp;D del proceso de absorción</i>	71
2.3.4. <i>Tabla de parámetros y variables planta de absorción de gases</i>	72
2.3.5. <i>Caracterización del equipo</i>	73
2.4. Planta de destilación continua	74
2.4.1. <i>Operación destilación simple</i>	77
2.4.2. <i>Operación destilación Batch</i>	80
2.4.3. <i>Operación destilación continua extractiva</i>	84
2.4.4. <i>Operación destilación continua azeotrópica</i>	88
2.4.5. <i>Tabla de parámetros y variables planta de absorción de gases</i>	91
2.4.6. <i>Caracterización del equipo</i>	93
<b>3. SEGURIDAD DE EQUIPOS</b>	<b>94</b>
3.1. What if de los equipos de CEPURE	95
3.1.1. <i>What if secador de bandejas</i>	95
3.2. Hazop de los equipos de CEPURE	96



3.2.1. <i>Hazop secador de bandejas</i>	96
3.3. Metodología bow-tie	100
3.3.1. <i>Diagrama bow-tie ejemplo</i>	100
3.4. Diagramas de flujo como semáforo de seguridad ecológico	101
3.4.1. <i>Consideraciones para la evaluación de los 12 principios</i>	101
3.5. Residuos a trabajar en los equipos de CEPURE	105
3.6. Etiquetas	108
<b>4. MANUALES DE REFERENCIA</b>	109
4.1. Manuales de referencia	109
4.2. Diagramas de procesos	112
4.3. Estructura para los manuales de CEPURE	113
4.3.1. <i>Estructura del manual de operaciones</i>	113
<b>5. CONCLUSIONES</b>	115
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	116
<b>ANEXOS</b>	119

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
<b>Figura 1.</b> Grafica de los tipos de humedad	19
<b>Figura 2.</b> Representación de periodos del secado.	23
<b>Figura 3.</b> Representación del contenido de humedad durante el secado.	24
<b>Figura 4.</b> Cuadro de extracción de sustancias biológicas por lixiviación.	26
<b>Figura 5.</b> Cuadro del proceso de extracción de minerales por lixiviación.	27
<b>Figura 6.</b> Cuadro del proceso de lixiviación para colorantes.	27
<b>Figura 7.</b> Esquema de la extracción solido – liquido.	28
<b>Figura 8.</b> Esquema de la extracción liquido – liquido.	31
<b>Figura 9.</b> Esquema del proceso de absorción.	35
<b>Figura 10.</b> Principio de destilación.	36
<b>Figura 11.</b> Diagrama de destilación simple.	37
<b>Figura 12.</b> Representación de la destilación batch.	38
<b>Figura 13.</b> Representación de la destilación extractiva.	39
<b>Figura 14.</b> Evolución de las estrategias de seguridad de procesos y prevención de accidentes/ pérdidas.	41
<b>Figura 31.</b> Diagrama de BFD del proceso de destilación simple	77
<b>Figura 32.</b> Diagrama PFD del proceso de destilación simple	78
<b>Figura 33.</b> Diagrama P&D del proceso de destilación simple	79
<b>Figura 15.</b> Secador de bandejas del Centro de purificación y refinación (CEPURE).	44
<b>Figura 16.</b> Diagrama BFD procesos de secado	47
<b>Figura 17.</b> Diagrama PFD del proceso de secado	48
<b>Figura 18.</b> Diagrama P&D del proceso de secado	49
<b>Figura 19.</b> Extracción líquido-líquido y sólido-líquido del Centro de purificación y refinación (CEPURE).	53
<b>Figura 20.</b> Diagrama de BFD del proceso de Extracción solido – liquido	57
<b>Figura 21.</b> Diagrama PFD del proceso de Extracción solido - liquido	58
<b>Figura 22.</b> Diagrama P&D del proceso de Extracción solido - liquido	59
<b>Figura 23.</b> Diagrama de BFD del proceso de Extracción liquido - liquido	60
<b>Figura 24.</b> Diagrama PFD del proceso de Extracción liquido - liquido	61
<b>Figura 25.</b> Diagrama P&D del proceso de Extracción liquido – liquido	62

<b>Figura 26.</b> Columna de absorción del Centro de purificación y refinación (CEPURE).	65
<b>Figura 27.</b> Descripción del BFD operación de absorción	69
<b>Figura 28.</b> Descripción del BFD operación de absorción	70
<b>Figura 29.</b> Descripción del BFD operación de absorción	71
<b>Figura 30.</b> Columna de destilación del Centro de purificación y refinación (CEPURE)	74
<b>Figura 34.</b> Diagrama de BFD del proceso de destilación Batch	80
<b>Figura 35.</b> Diagrama PFD del proceso de destilación Batch	81
<b>Figura 36</b> Diagrama P&D del proceso de destilación Batch	82
<b>Figura 37.</b> Descripción del BFD operación de destilación continua extractiva	84
<b>Figura 38.</b> Diagrama PFD del proceso de destilación continua extractiva	85
<b>Figura 39.</b> Diagrama P&D del proceso de destilación continua extractiva	86
<b>Figura 40.</b> Diagrama BFD del proceso de destilación continua azeotrópica	88
<b>Figura 41.</b> Diagrama PFD del proceso de destilación continua azeotrópica	89
<b>Figura 42.</b> Diagrama P&D del proceso de destilación continua azeotrópica	90
<b>Figura 43.</b> Metodología bow-tie de la planta de destilación.	100
<b>Figura 44.</b> Simbología para diagramas de flujo	102
<b>Figura 45.</b> Criterios para evaluar los principios de química verde en los experimentos	103
<b>Figura 46.</b> Código de color en función del número de principios de la química verde que cumple el experimento	104
<b>Figura 47.</b> Cuadro comparativo de los manuales de referencia con su respectivo aspecto de interés	109

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Instrumentación del secador de bandejas	46
<b>Tabla 2.</b> Tabla de Parámetros y variables por equipo del secador de bandejas	50
<b>Tabla 3.</b> Especificación del aceite térmico	54
<b>Tabla 4.</b> Instrumentación del extractor solido- líquido y liquido – liquido	56
<b>Tabla 5.</b> Tabla de parámetros y variables extracción sólido-líquido y líquido-líquido	63
<b>Tabla 6.</b> Tabla de parámetros y variables planta de absorción de gases	72
<b>Tabla 7.</b> Tabla de parámetros y variables planta de absorción de gases	91
<b>Tabla 8.</b> Tabla de What if del secador de bandejas	95
<b>Tabla 9.</b> Hazop del secador de bandejas	96
<b>Tabla 10.</b> Cuadro de sustancias a trabajar en el secador de bandejas del CEPIIS	105
<b>Tabla 11.</b> Cuadro de sustancias a trabajar en la planta de extracción PESL del CEPIIS	106
<b>Tabla 12.</b> Cuadro de sustancias a trabajar en la planta de destilación PDC3 - M del CEPIIS	107
<b>Tabla 13.</b> Cuadro de sustancias a trabajar en la Planta de absorción PAG - M del CEPIIS	108

## RESUMEN

Este proyecto se realizó con el fin de desarrollar un manual de operación para el centro de purificación y refinación del centro de procesos e innovación (CEPIIS) de la Universidad de América. El cual incluye, identificar variables, parámetros y aspectos de seguridad operacionales de los equipos, establecer cuáles son los procedimientos de operación a partir de la información suministrada por los proveedores, realizar una integración con otros equipos de CEPIIS que puedan suministrar información relevante de los equipos, actualizar la información del manual a partir de guías y manuales de equipos con potencial aplicación y por último desarrollar la estructura central de los manuales de operación, para su posterior construcción.

En primer lugar, se recopiló información de las operaciones realizadas por cada equipo, para ubicar parámetros de operación teóricos, como también se realizó una búsqueda de análisis de seguridad y tratamiento de residuos.

En segunda instancia se recopiló información de los parámetros de operación de los equipos, a partir de la información que suministró el proveedor. Para la integración de los equipos de CEPIIS, se seleccionaron dos trabajos. Un trabajo en donde se realizaron los análisis de seguridad what if, hazop y bow-tie de los equipos y un segundo trabajo relacionado con el desarrollo de una propuesta para el tratamiento de los residuos peligrosos de los equipos.

En tercera instancia se recopiló información de diferentes guías y manuales de operación, que servirán como antecedentes para realizar la estructura de los manuales de operación. Por último, se desarrolló la estructura de los manuales de operación y se implementó el desarrollo de una ficha de seguridad que nos permita identificar a los equipos en CEPIIS.

Al final del documento se encuentran los manuales de operación y las fichas de seguridad desarrollados en este trabajo, también las conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos relacionados con los equipos de CEPURE.

**Palabras clave:** Manual de Operación, CEPIIS, Purificación, Universidad de América, Refinación, Innovación.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar la propuesta de manuales de operación para las unidades del Centro de Purificación y Refinación del Centro de Procesos e Innovación de la Universidad de América.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Identificar las variables y parámetros operacionales de los equipos de CEPURE, considerando aspectos de seguridad y de control de procesos.
2. Establecer los procedimientos de operación de los equipos de CEPURE según información suministrada por proveedores y la integración con el CEPIIS.
3. Actualizar la información obtenida de los procedimientos de operación a partir de equipos de escala semi industrial con potencial aplicación al CEPURE.
4. Estructurar los manuales de operación de los equipos de CEPURE considerando las condiciones de operación y de seguridad según las proyecciones de uso.

## INTRODUCCIÓN

Las facultades de ingeniería en todas sus competencias, necesitan tanto la profundización teórica como de la realización de prácticas en ambientes académicos, donde se realicen tanto proyectos de estudiantes, como de los profesores e investigadores de las instituciones. Además de esto, en Colombia son pocas las Universidades o centros de enseñanza que cuentan con un laboratorio planta piloto o centro de procesos, ya que estas inversiones superan los 500 millones, y quienes los poseen se convierten en referentes para la investigación y producción de proyectos de diferentes escalas [1].

Cuando una institución cuenta con un Centro de Procesos o Laboratorio Planta Piloto, y trabaja en el diseño de manuales de operación que sean específicos de los equipos, donde se tenga un instructivo para el manejo óptimo de la unidad, preservando la integridad de estos, y además contenga la forma de trabajo de las diferentes unidades cuando son integradas en los procesos puntuales a desarrollar, los recursos que se utilizarán serán los precisos, por lo que los costos energéticos, de tratamientos a los residuos de aguas y demás, serán los mínimos posibles, permitiendo evaluar de una manera mucho más pertinente y sin tanta incertidumbre, la viabilidad económica de un proyecto [2].

Los manuales de operación son herramientas que permiten la estandarización de actividades y/o procesos de una empresa, estos son un instrumento de apoyo en que se encuentran de manera sistemática los pasos a seguir para llevar a cabo las diferentes actividades que allí se desarrollen (bien sea un equipo o área de proceso). En las industrias manufactureras, de procesos químicos y biológicos, es de vital importancia generar documentos de cada una de las unidades de proceso con el fin de mantener la integridad de estos equipos (ya que son muy específicos y/o costosos), además de la generación de procedimientos eficientes y seguros, dando poco lugar a la incertidumbre en las diferentes etapas de funcionamiento de los mismos.

Por otra parte, el desarrollo de estos manuales sirve como herramienta indispensable para que los diferentes tipos de usuarios logren un acercamiento práctico y preciso a los equipos, por lo que su diseño y la rigurosidad en la que se presenta la información, debe tener en cuenta estos usuarios potenciales.

Los manuales que actualmente poseen los equipos del Centro de Purificación y Refinación del CEPIIS; que incluyen una planta de destilación continua, una planta de absorción, una planta de

extracción sólido - líquido y líquido - líquido y un secador de bandejas, estos manuales son los que proporcionan los proveedores, y aunque estos poseen información básica de su principio de funcionamiento, caracterización de las partes del equipo, descripción de la instrumentación y precauciones, deben ser actualizados teniendo en cuenta las proyecciones de uso del CEPIIS y su integración con otras áreas del mismo.

El presente proyecto tiene como objetivo, estructurar unos manuales de operación para los equipos del centro de purificación y refinación (CEPURE). Que recoja toda la información de seguridad, parámetros de operación, guías de funcionamiento, especificaciones del equipo y que también se integre con otras áreas de investigación de el centro de procesos e innovación para la industria sostenible (CEPIIS). Además de utilizar información de manuales y guías de equipos similares con potencial aplicación, que complementen la información reunida. Para desarrollar una estructura muy completa.



## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1. Secado

Por lo general, el término *secado* se refiere a la eliminación de humedad en una sustancia. Se aplica tan fácil e incongruentemente que es necesario restringir su significado en el análisis presente del tema. Por ejemplo, un sólido húmedo, como madera, tela o papel, puede secarse por evaporación de la humedad ya sea en una corriente de gas o sin el beneficio del gas para acarrear el vapor; sin embargo, generalmente no se considera como secado la eliminación mecánica de esta humedad mediante el exprimido o centrifugado [3].

#### 1.1.1. Importancia del secado

Uno de los motivos para el secado de los alimentos es su conservación; sin embargo, hay otras razones para llevar a cabo este proceso y son:

- Obtener un producto con el grado de humedad que exige la comercialización.
- Evitar cambios físicos o químicos por un exceso de humedad.
- Disminuir los costos de manejo, transporte, empaque y almacenamiento.
- Adecuar el material para procesos ulteriores.
- Eliminar la humedad adquirida en operaciones previas.
- Recuperar subproductos.
- Obtener productos que favorezcan al consumidor. [5].

La importancia de esta técnica deriva del hecho por el cual pequeñas cantidades de humedad inhiben la cristalización de muchas sustancias. Además, muchos líquidos, cuando destilan en presencia de agua, reaccionan con ésta (se hidrolizan) o destilan con el agua (se arrastran) a temperaturas bastantes distantes de sus puntos de ebullición. Por estas razones, el paso final, antes de la recristalización de un sólido o de la destilación de un líquido, es la eliminación del agua que lleva consigo mediante algún proceso de secado [4].

Las normas de comercialización establecen contenidos máximos de humedad para productos alimenticios y en muchas ocasiones se hace necesario el secado para lograr los valores prefijados como es el caso de los cereales que se admiten con un máximo del 15% de humedad, cuando las condiciones climáticas dejan productos del 18% o aún más de humedad. Así no ocurran cambios microbiológicos que deterioren los productos, la humedad puede favorecer cambios físicos o químicos como el color, la textura y aún el sabor en productos de panificación o repostería. Los

productos deshidratados ocupan menor volumen y tienen menor peso que los productos originales, consecuentemente los costos del manejo en general se ven disminuidos favoreciendo tanto al productor como al comprador. Los huevos deshidratados pesan la quinta parte y ocupan una sexta parte del volumen de los naturales y se pueden conservar en condiciones ambientales sin necesidad de refrigeración. El manejo de materias primas implica el tener cantidades adecuadas, así su consumo diario sea relativamente bajo. El empleo de productos desecados permite extraer partes del material sin que se afecte el resto o se modifiquen las condiciones de almacenamiento, favoreciendo así el manejo [5].

### **1.1.2. Contenido de Humedad**

Se van a resumir a continuación ciertos términos que se utilizan para describir el contenido de humedad de las sustancias.

- **Contenido de humedad, en base húmeda.**

El contenido de humedad de un sólido o solución generalmente se describe en función del porcentaje en peso de humedad; a menos que se indique otra cosa, se sobreentiende que está expresado en base húmeda, es decir, como

$$(kg \text{ humedad} / kg \text{ sólido húmedo}) 100 = \frac{kg \text{ humedad}}{(kg \text{ sólido seco} + kg \text{ humedad})} * 100 = \frac{100X}{1 + x}$$

- **Contenido de humedad, base seca.**

Se expresa como  $\frac{kg \text{ humedad}}{kg \text{ sólido seco}} = X$

Porcentaje de humedad, base seca = 100X.

- **Humedad en el equilibrio  $x^*$ .**

Es el contenido de humedad de una sustancia que está en el equilibrio con una presión parcial dada del vapor [3].

El contenido de humedad de equilibrio corresponde al contenido de humedad más bajo que puede obtenerse bajo las condiciones de secado usadas. Una vez se alcanza el contenido de humedad de equilibrio, no existe secado adicional porque el potencial de humedad es cero. La presión de vapor sobre el sólido es igual a la presión parcial de vapor del gas [5].

- **Humedad ligada.**

Se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor que la del líquido puro a la misma temperatura [3].

Es la humedad mínima necesaria para que el sólido deje de comportarse como higroscópico, o bien es el valor de la humedad de equilibrio del sólido en contacto con aire saturado.

Esta se aplica en la industria alimenticia, se encuentra en los alimentos con agua de cristalización (hidrato) o ligada a las proteínas. Parte de la misma permanece ligada al alimento incluso a la temperatura que lo carboniza [5].

- **Humedad no ligada.**

Se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual a la del líquido puro a la misma temperatura [3].

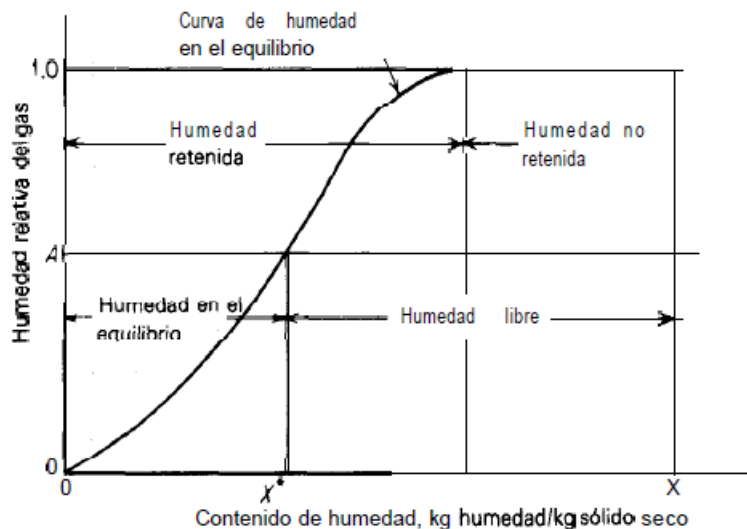
Es la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad ligada; y representa al agua que está absorbida (no adsorbida), empapando el sólido, retenida, pero sin interactuar con el sólido. O bien la humedad libre del sólido en contacto con aire saturado. Es evidente que si el sólido tiene humedad desligada se comportará como húmedo [5].

- **Humedad libre.**

La humedad libre es la humedad contenida por una sustancia en exceso de la humedad en el equilibrio:  $X - x^*$ . Sólo puede evaporarse la humedad libre; el contenido de humedad libre de un sólido depende de la concentración del vapor en el gas [3].

**Figura 1.**

*Grafica de los tipos de humedad*



**Nota.** La figura es una comparación de los tipos de humedad, que mide el contenido de humedad contra la humedad relativa del gas. Tomado de: R. E. Treybal, *Operaciones de transferencia de masa*, 2ª. Ed., México: McGRAW-HILL, 2000.

En el gráfico presentado en la figura 1, podemos evidenciar la relación que existe entre los tipos de humedad, para un sólido con un contenido de humedad X expuesto a un gas de humedad relativa A.

### **1.1.3. Operaciones de secado**

La clasificación siguiente es útil para delinear las teorías de secado y los métodos de diseño.

#### 1.1.3.a Método de operación por lotes o continuo.

El equipo por lotes, o semilotes, se opera intermitente en condiciones ‘de estado no estacionario: el secador se carga con la sustancia, que permanece en el equipo hasta que se seca; entonces, el secador se descarga y se vuelve a cargar con un nuevo lote.

Los secadores continuos generalmente se operan en estado estacionario.

#### 1.1.3.b Método según la fuente de calor [3].

En los secadores *directos*, el calor se obtiene completamente por contacto directo de la sustancia con el gas caliente en el cual tiene lugar la evaporación.

En los secadores *indirectos*, el calor se obtiene independientemente del gas que se utiliza para acarrear la humedad evaporada. Por ejemplo, el calor puede obtenerse por conducción a través de una pared metálica en contacto con la sustancia o, con menos frecuencia, por exposición de la sustancia a radiación infrarroja o calentamiento dieléctrico. En este último caso, el calor se genera dentro del sólido mediante un campo eléctrico de alta frecuencia.

#### 1.1.3.c Adecuación de la sustancia [3].

La naturaleza de la sustancia que se va a secar, tiene la mayor influencia sobre el secador que se va a utilizar, tanto su forma física, que va desde un sólido rígido, un material flexible, un sólido granular, si es frágil o fuerte. Como los métodos de manejo de materia. Pueden favorecer un método de secado, de otro [3].

### **1.1.4. Clasificación de secadores**

**Secadores Directos** La transferencia de calor para la desecación se logra por contacto directo entre los sólidos húmedos y los calientes. El líquido vaporizado se arrastra con el medio de desecación; es decir con los gases calientes. Los secadores se llaman también secadores por convección.

- **Secadores D-Continuos** La operación es continua sin interrupciones, en tanto se suministre la alimentación húmeda. Es evidente que cualquier secador continuo puede funcionar en forma intermitente por lotes, si así se desea.

- Secadores D-Por Lotes Se diseña para operar con un tamaño específico de lote de alimentación húmeda, para ciclos de tiempo dado. En los secadores por lote las condiciones de contenido de humedad y temperatura varían continuamente en cualquier punto del equipo [6].

Secadores Indirectos El calor de desecación se transfiere al sólido húmedo a través de una pared de retención. El líquido vaporizado se separa independientemente del medio de calentamiento. La velocidad de desecación depende del contacto que se establezca entre el material mojado y las superficies calientes. Los secadores indirectos se llaman también secadores por conducción o de contacto.

- Secadores I-. Continuos La desecación se efectúa haciendo pasar el material de manera continua por el secador poniéndolo en contacto con las superficies calientes.
- Secadores I-Por Lotes En general los secadores indirectos por lotes se adaptan muy bien a las operaciones vacío. Se subdividen en tipos agitados y no agitados [6].

### ***1.1.5. Factores que influyen en el proceso de secado***

1.1.5.a Temperatura del aire: La temperatura del aire juega un papel importante durante el proceso de secado. Por lo general mientras que esta se incrementa, la velocidad de secado también es mayor, teniendo en cuenta que para cada material existe una temperatura óptima de secado. Durante el proceso de secado es importante conocer tanto la temperatura de bulbo seco, como la temperatura de bulbo húmedo del aire, ya que a partir de estas se puede determinar el contenido de humedad del aire. La temperatura de bulbo seco es la que se determina de forma ordinaria por medio de una termocupla o un termómetro de mercurio. Mientras que la temperatura de bulbo húmedo, es la temperatura de equilibrio obtenida por una superficie de agua cuando la velocidad de transferencia de calor por convección hacia la superficie es igual a la velocidad de transferencia de masa que se aleja de la superficie [7].

1.1.5.b Humedad del aire: Cuando el aire contiene una pequeña cantidad de humedad tiene una mayor capacidad de absorber agua. Por lo tanto, cuando el aire se encuentra totalmente saturado es incapaz de absorber más humedad [7].

1.1.5.c Velocidad del aire: La velocidad del aire dentro del secador tiene básicamente dos objetivos principales. El primero es transmitir la energía necesaria para la evaporación de la humedad y el segundo es transportar la humedad saliente del material. Para cada material existe

una velocidad óptima del aire a la cual se obtienen buenos resultados del proceso de secado, y puede ser determinada de manera experimental [7].

1.1.5.d Dirección del flujo de aire: El flujo del aire dentro del equipo puede ser orientado en dirección tangencial o transversal al lecho de secado. El tipo de flujo comúnmente usado es el tangencial, estando el flujo transversal limitado al secado de productos cristalinos o granulares [7].

### ***1.1.6. Comportamiento General del Secado***

- Periodo de estado inestable

Una vez se pone en contacto el sólido húmedo con el medio de secado, la temperatura del sólido se ajusta hasta alcanzar un estado estable. Este estado se puede alcanzar bien sea por un aumento o reducción en la temperatura del sólido y en la velocidad de secado. Cuando se alcanza el estado estable, la temperatura en la superficie del sólido húmedo es igual a la temperatura de bulbo húmedo del medio de secado. Las temperaturas en el interior del sólido también tienden a igualarse a la de bulbo húmedo del gas, dependiendo el tiempo en que la alcanzan dicha temperatura, del movimiento de masa y calor dentro del sólido [7].

- Periodo de velocidad constante:

Cuando las temperaturas alcanzan la temperatura de bulbo húmedo del gas, se mantienen casi constantes al igual que la velocidad de secado. Durante este periodo la superficie total expuesta está saturada de líquido, por lo tanto, la evaporación ocurre sobre la superficie totalmente mojada, y el líquido se remueve continuamente por difusión rápida desde el interior. Puesto que la evaporación de humedad absorbe calor latente, la superficie líquida llega y permanece a una temperatura en el equilibrio tal que la rapidez del flujo de calor en el entorno de la superficie es exactamente igual a la rapidez de absorción de calor.

El periodo de velocidad constante termina cuando el sólido alcanza el contenido crítico de humedad [7].

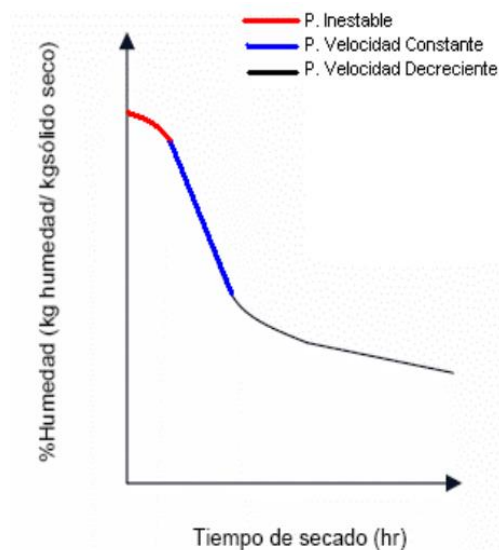
- Periodo de velocidad decreciente:

Este periodo puede durar un tiempo mayor que el periodo de velocidad constante, aunque la eliminación de humedad puede ser considerablemente menor. La aparición de puntos secos durante este periodo se debe a que la velocidad de movimiento del líquido hacia la superficie es menor que la transferencia de masa desde la superficie. El proceso de secado continúa, llegando

a un momento en el que no existe un área significativa de superficie saturada de líquido. La parte de superficie que está saturada se seca por transferencia conectiva desde la corriente de gas secante y transferencia de masa hacia la misma. El vapor se difunde desde los niveles interiores de la muestra hasta la parte de la superficie que no está saturada y continúa su difusión hacia la corriente gaseosa . Debido a que el contenido de humedad sigue disminuyendo a lo largo del proceso, la trayectoria para la difusión de calor y masa crece más hasta que la velocidad de secado se tiende a cero [7].

**Figura 2.**

*Representación de periodos del secado.*



**Nota.** La figura es una representación del comportamiento de los periodos, durante el proceso de secado. Tomado de: A. D. P. CÁRDENAS GÓMEZ , CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN SECADOR DE BANDEJAS DIRECTO PARA LA OBTENCIÓN DE CURVAS DE SECADO, BOGOTÁ : UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, 2005.

- Contenido de Humedad de Equilibrio

El contenido de humedad de equilibrio corresponde al contenido de humedad más bajo que puede obtenerse bajo las condiciones de secado usadas.

Una vez se alcanza el contenido de humedad de equilibrio, no existe secado adicional porque el potencial de humedad es cero. La presión de vapor sobre el sólido es igual a la presión parcial de vapor del gas [7].

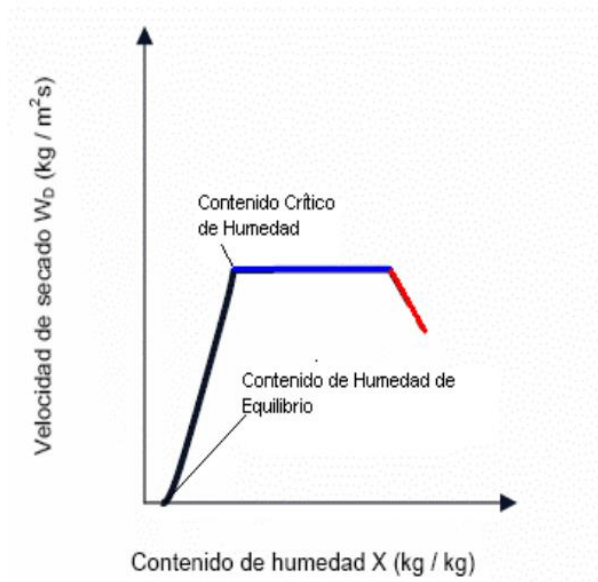
- Contenido crítico de humedad

Cuando el contenido promedio de humedad del sólido alcanza el contenido crítico de humedad, la película superficial de humedad se reduce de tal forma que el secado posterior genera puntos

secos en la superficie del sólido. Después de este punto la temperatura del sólido aumenta y la velocidad de secado decrece [7].

**Figura 3.**

*Representación del contenido de humedad durante el secado.*



**Nota.** La figura es una representación del comportamiento de la humedad, durante el proceso de secado. Tomado de: A. D. P. Cárdenas Gómez, “Construcción y puesta en marcha de un secador de bandejas directo para la obtención de curvas de secado”, Bogotá : Universidad de los Andes, 2005. [PDF].

Disponible: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/22170/u262181.pdf?sequenc>. [Último acceso: 20 noviembre 2022].

## 1.2. Extracción sólido – líquido

Muchas sustancias biológicas, así como compuestos inorgánicos y orgánicos, se encuentran como mezclas de diferentes componentes en un sólido. Para separar el soluto deseado o eliminar un soluto indeseable de la fase sólida, el sólido se pone en contacto con una fase líquida. Ambas fases entran en contacto íntimo y el soluto o los solutos se difunden desde el sólido a la fase líquida, lo que permite una separación de los componentes originales del sólido. Este proceso de separación se llama *lixiviación líquido-sólido* o simplemente, *lixiviación* [8].

La extracción sólido - líquido, es una operación de la ingeniería química que se usa en numerosos procesos industriales. Técnicamente, es una operación de transferencia de masa, donde un



disolvente o mezcla de estos, extraen selectivamente uno o varios solutos que se hallan dentro de una matriz sólida. El componente o componentes que se transfieren se denominan "solutos" y el sólido insoluble se denomina "inerte"

El mecanismo de transferencia de masa se realiza de acuerdo al siguiente orden:

- Difusión del disolvente a través del sólido.
- Disolución del soluto en el disolvente.
- Transferencia del soluto desde el interior a la superficie y luego hacia la solución como consecuencia de la gradiente de la concentración [9].

### ***1.2.1. Procesos de lixiviación***

Dentro de los procesos de lixiviación encontramos dos tipos:

#### ***1.2.1.a Procesos de lixiviación para sustancias biológicas.***

En la industria de procesos biológicos y alimenticios, muchos productos se separan de su estructura natural original por medio de una lixiviación líquido-sólido. Un proceso importante es la lixiviación de azúcar de la remolacha con agua caliente. En la producción de aceites vegetales, se emplean disolventes orgánicos como hexano, acetona y éter, para extraer aceite de cacahuate, soya, semillas de lino, semillas de ricino, semillas de girasol, semillas de algodón, harina, pasta de palo e hígado de hipogloso. En la industria farmacéutica se obtiene una gran diversidad de productos por lixiviación de raíces, hojas y tallos de plantas. En la producción de café "instantáneo" soluble, el café tostado y molido se somete a una lixiviación con agua pura. El té soluble se fabrica por lixiviación de hojas de té con agua. El tanino se extrae de las cortezas de árboles por lixiviación con agua [8].

#### ***1.2.1.b Procesos de lixiviación para materiales inorgánicos y orgánicos.***

Los procesos de lixiviación son de uso común en la industria metalúrgica. Los metales útiles suelen encontrarse en mezclas con grandes cantidades de constituyentes indeseables, y la lixiviación permite extraerlos en forma de sales solubles. Las sales de cobre se disuelven o se lixivian de los minerales molidos que contienen otras sustancias por medio de soluciones de ácido sulfúrico o amoniacales. Las sales de cobalto y níquel se lixivian de sus minerales con mezclas de ácido sulfúrico-amoniaco-oxígeno. La lixiviación de oro a partir de sus minerales, se basa en el uso de una solución acuosa de cianuro de sodio. El hidróxido de sodio se lixivia de una suspensión de

carbonato de calcio e hidróxido de sodio, que se prepara haciendo reaccionar  $N\sim C03$  con  $Ca(OH)2$  [8].

### 1.2.2. Aplicaciones de la extracción sólido – líquido en la industria


Existen varias aplicaciones de la operación de extracción sólido - líquido en diferentes sectores de la industria de procesos, tales como en la industria minera, alimentaría, farmacéutica y en la industria de esencias y perfumes.

A continuación, se dará a conocer algunas aplicaciones de la operación de extracción sólido - líquido.

- Proceso de lixiviación para sustancias biológicas

**Figura 4.**

Cuadro de extracción de sustancias biológicas por lixiviación.

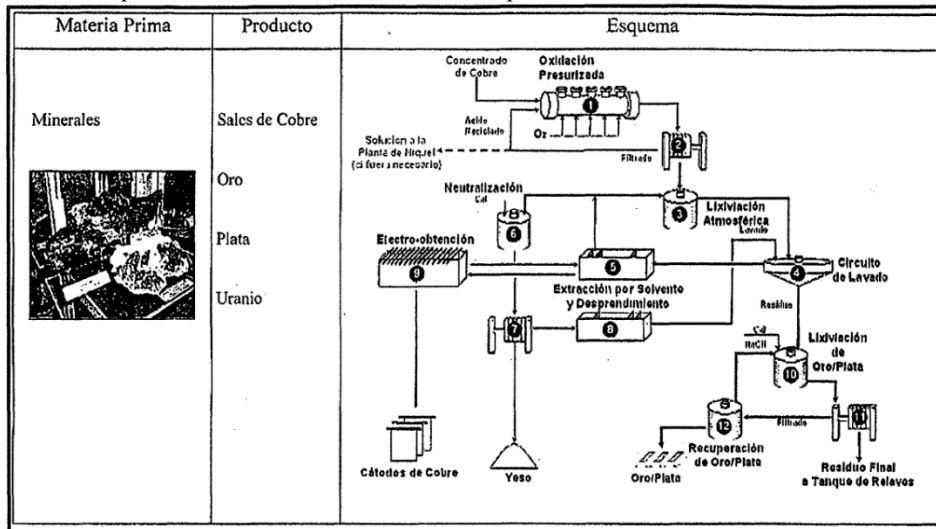
Materia Prima	Producto	Esquema	Usos
Maní <i>(Arachis hypogaea L.)</i> Soya <i>(Glycine soja, Soja hispida, Soja dolichos)</i> Girasol <i>(Helianthus agnus)</i> Algodón <i>(Gossypium herbaceum)</i> Ajonjolí <i>(Sesamum indicum L.)</i> Ricino <i>(Ricinos communis)</i> Maiz <i>(Zea mays)</i> Palma	Aceites de semillas oleaginosas 	<p style="text-align: center;"><b>Proceso de obtención de los aceites de semillas</b></p> <p style="text-align: center;">Limpieza Secado Descascarillado Separación de las cáscaras Acondicionamiento de las semillas Trituración/Laminado</p> <p style="text-align: center;">Extracción</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p><b>Por presión</b></p> <p>Aceite + torta proteica</p> <p>Tamizado Filtrado</p> <p>aceite de semillas</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p><b>Sólido-líquido (disolvente)</b></p> <p><i>miscela (aceite+disolvente)</i> Filtración Precontracción Alimentación disolvente Refinación</p> <p>Aceite de semillas</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p><i>harina (+disolvente)</i> Eliminación disolvente Secado</p> <p>Harina</p> </div> </div>	<p>Los aceites obtenidos a partir de las semillas oleaginosas son esenciales para la alimentación humana. Usados también como lubricantes para máquinas industriales, composición de pinturas y productos cosméticos. En la actualidad se está incorporando estos aceites como insumo para el desarrollo de combustibles ecológicos (Biodiesel)</p>

**Nota.** La figura representa algunas sustancias biológicas que se extraen por lixiviación. Tomado de: J. C. Palacios Manrique y R. Sánchez Vilca, “Diseño, construcción y evaluación de parámetros de operación de un equipo de extracción sólido - líquido para el laboratorio de procesos unitarios de la facultad de ingeniería química de la universidad Nacional del centro del Perú”, Huancayo- Perú: Universidad Nacional del centro del Perú, 2008. [PDF]. Disponible: [https://repositorio.unep.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/217/T-08\\_13.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unep.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/217/T-08_13.pdf?sequence=1&isAllowed=y) [Último acceso: 20 noviembre 2022].

- Proceso de extracción de materiales inorgánicos

**Figura 5.**

*Cuadro del proceso de extracción de minerales por lixiviación.*

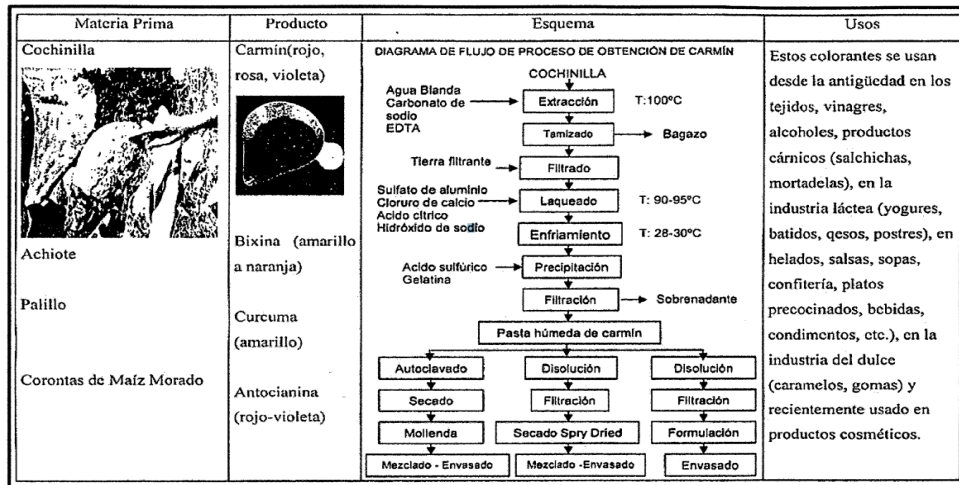


**Nota.** La figura representa el proceso de lixiviación para minerales y algunos ejemplos. Tomado de: J. C. Palacios Manrique y R. Sánchez Vilca, “Diseño, construcción y evaluación de parámetros de operación de un equipo de extracción sólido - líquido para el laboratorio de procesos unitarios de la facultad de ingeniería química de la universidad Nacional del centro del Perú”, Huancayo- Perú: Universidad Nacional del centro del Perú, 2008. [PDF]. Disponible: [https://repositorio.unpc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/217/T-08\\_13.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unpc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/217/T-08_13.pdf?sequence=1&isAllowed=y) [Último acceso: 20 noviembre 2022].

- Obtención de colorantes.

**Figura 6.**

*Cuadro del proceso de lixiviación para colorantes.*

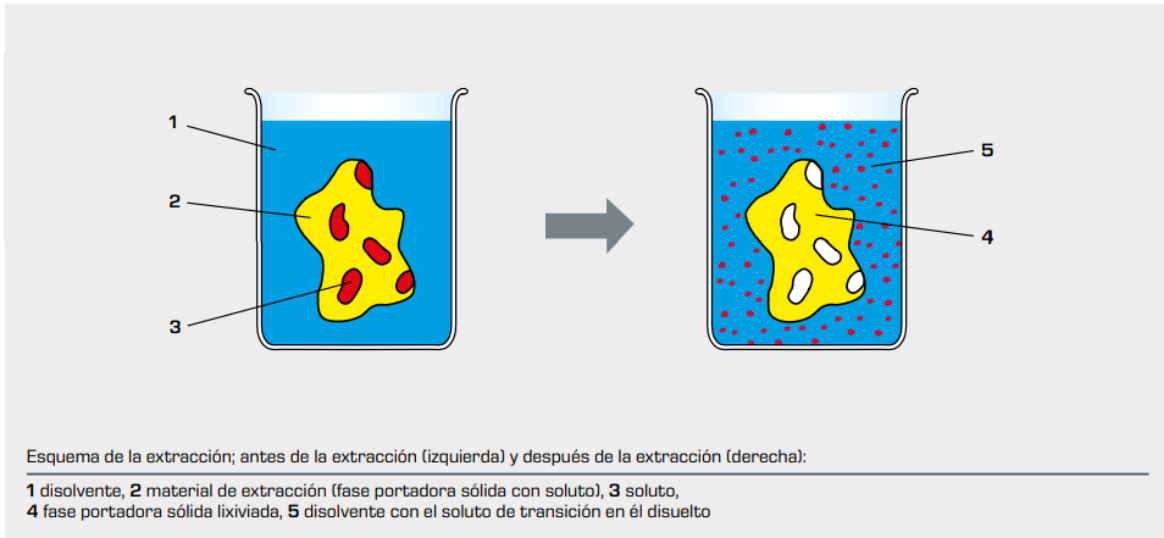


**Nota.** La figura representa el proceso de lixiviación para colorantes y ejemplos. Tomado de: J. C. Palacios Manrique y R. Sánchez Vilca, “Diseño, construcción y evaluación de parámetros de operación de un equipo de extracción sólido - líquido para el laboratorio de procesos unitarios de la facultad de ingeniería química de la universidad Nacional del centro del Perú”, Huancayo- Perú: Universidad Nacional del centro del Perú, 2008. [PDF]. Disponible: [https://repositorio.unpc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/217/T-08\\_13.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unpc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/217/T-08_13.pdf?sequence=1&isAllowed=y) [Último acceso: 20 noviembre 2022].

### 1.2.3. Proceso de extracción sólido – líquido

Figura 7.

Esquema de la extracción sólido – líquido.



**Nota.** La figura representa un esquema del disolvente y el soluto antes y después de la extracción. Tomado de: G. Hamburg, “Equipment for Engineering Education”, [En línea]. Disponible: [https://www.gunt.de/images/download/extraction\\_spanish.pdf](https://www.gunt.de/images/download/extraction_spanish.pdf). [Último acceso: 20 noviembre 2022].

Para conseguir una extracción lo más rápida y completa posible del sólido, se tiene que ofrecer al disolvente superficies de intercambio grandes y recorridos de difusión cortos. Esto se puede lograr triturando el sólido a extraer. Un tamaño de grano demasiado pequeño puede causar, por el contrario, apelmazamiento que dificulta el paso del disolvente. En la forma más sencilla de esta operación básica se mezclan bien el material de extracción y el disolvente. A continuación, se separa y se regenera el disolvente junto con el soluto en él disuelto.

El material de extracción puede estar presente también como lecho fijo, que es atravesado por el disolvente. En otra forma de aplicación, el material de extracción percola a través del disolvente. La regeneración del disolvente consiste, generalmente, en un proceso de evaporación/destilación. En él se elimina parte del disolvente y queda una solución concentrada de extracto como producto. El disolvente se condensa y se puede reutilizar. [10]

### 1.2.4. Variables que influyen en la extracción sólido – líquido

La eficiencia en la extracción del soluto en materiales orgánicos, inorgánicos, animales y vegetales depende del tamaño de las partículas, del tipo de solvente, pH y la temperatura. Así tenemos.

1.2.4.a Tamaño de la partícula: El tamaño de la partícula afecta la velocidad de extracción de

diversas maneras; cuanto más pequeño es el tamaño, mayor es el área de contacto entre el sólido y el líquido y por tanto mayor la velocidad de transferencia de masa; pero partículas en forma de polvo muy fino causan problemas de apelmazamiento, evitando de esta manera la transferencia de masa, por lo que es necesario determinar una granulometría adecuada resultado de pruebas experimentales. [9]

1.2.4.b Selección del solvente: es una sustancia que puede disolver y producir con otra una mezcla homogénea. Estos son producidos y utilizados en grandes cantidades bajo una gran variedad de denominaciones comerciales y químicas 11 en casi todas las industrias. La mayoría son altamente inflamables y prenden fuego fácilmente. Son muy volátiles, pudiendo formar con gran rapidez una mezcla explosiva aire - vapor del solvente.

Criterios de Selección del Solvente:

- De penetración fácil en las partículas.
- No higroscópico.
- No tóxico, ni cancerígeno para su uso en productos alimenticios.
- Bajo punto de ebullición.
- Ambientalmente seguro.
- Para extracción de grasas y aceites, usar solventes con bajo poder de extracción de proteínas, aminoácidos y carbohidratos.
- Fácilmente recuperables para reciclaje.
- No corrosivo.
- No inflamable.
- Estar siempre disponible en el mercado.
- Económico. [9]

1.2.4.c pH: Como el uso de los números tales como  $1 \cdot 10^{-7}$  y  $1 \cdot 10^{-3} \cdot 2$  es engorroso e incómodo, la acidez a alcalinidad de una solución se expresa comúnmente en una escala logarítmica por medio de lo que se llama pH. El pH de una solución se define como el logaritmo decimal del inverso de la concentración de iones hidrógeno en moles/litro. Esto equivale a decir, que el pH es el logaritmo decimal negativo de la concentración de iones  $H^+$ . Así tenemos: El pH es otra de las variables que afecta en gran medida a la solubilidad del soluto. Una selección adecuada de pH permite obtener una elevada solubilidad del soluto a extraer, al mismo tiempo que evita la disolución de componentes no deseados. [9]

1.2.4.d Temperatura de Extracción: Un incremento de temperatura del solvente acelera la velocidad de extracción debido a la disminución de la viscosidad del líquido que incrementa el coeficiente de difusión. La temperatura máxima de difusión está limitada por la temperatura de ebullición del solvente, la estabilidad del producto o solvente, o factores económicos. Las temperaturas altas producen solubilidades superiores del soluto en el solvente y por consiguiente la concentración del soluto es alta en el extracto. Sin embargo, es necesario precisar que, en el tratamiento a temperaturas altas en el caso de algunos materiales de origen natural, como el café, té, remolachas, resulta una extracción excesiva de materiales no deseados. Las operaciones a temperaturas altas no pueden ser permisibles debido a las pérdidas inaceptables de solventes y por consideraciones de seguridad. Existe la necesidad de tener experiencia en la selección de una temperatura adecuada. [9]

### **1.3. Extracción líquido – líquido**

La extracción líquida, llamada algunas veces extracción con disolventes, es la separación de los componentes de una solución líquida por contacto con otro líquido insoluble. Si las sustancias que componen la solución original se distribuyen de manera distinta entre las dos fases líquidas, se puede lograr cierto grado de separación, que puede incrementarse mediante el uso de contactos múltiples o su equivalente en la forma de la absorción de gases y la destilación. [3]

Cuando la separación por destilación es ineficaz o muy difícil, la extracción de líquidos es una de las alternativas a considerar. Mezclas con temperaturas de ebullición próximas o sustancias que no pueden soportar la temperatura de destilación, aun en condiciones de vacío, con frecuencia se separan de las impurezas por extracción, que utiliza diferencias de estructura química en vez de diferencias de volatilidad. Por ejemplo, la penicilina se recupera del caldo de fermentación por extracción con un solvente, tal como acetato de butilo, después de disminuir el pH para obtener un coeficiente de partición favorable. El solvente se trata después con una solución amortiguadora de fosfato para extraer la penicilina del solvente y obtener una solución acuosa purificada, a partir de la cual se obtiene la penicilina por secado. La extracción también se utiliza para recuperar ácido acético de soluciones diluidas; la destilación sería posible en este caso, pero la etapa de extracción reduce en forma considerable la cantidad de agua que es preciso destilar. [11]

La extracción líquido-líquido puede presentar ventajas sobre efectuar una separación por

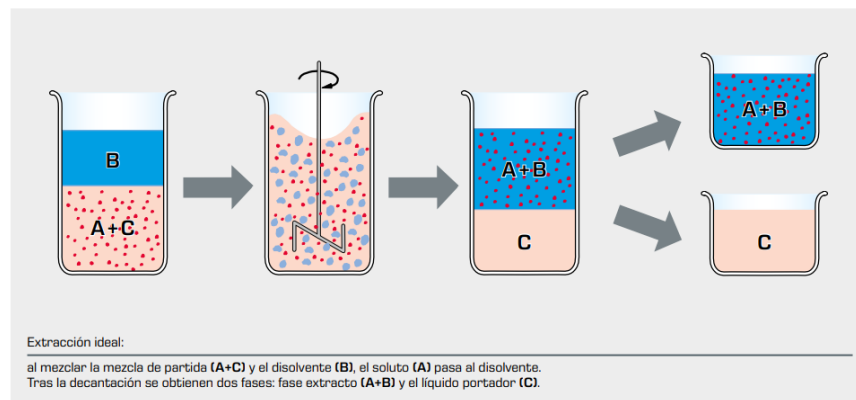
destilación: las instalaciones son más sencillas, hay la posibilidad de separar componentes sensibles al calor sin necesidad de realizar una destilación a vacío y la selectividad del disolvente para componentes de naturaleza química similar permite separaciones de grupos de componentes imposibles de lograr basándose sólo en el punto de ebullición. [12]

### 1.3.1. Descripción del proceso de extracción líquido – líquido

En el caso más sencillo participan tres componentes: • el soluto A • el disolvente B • el líquido portador C El soluto A forma parte de la mezcla de partida junto con el líquido portador C (alimento). Si la mezcla de partida y el disolvente B se mezclan entre sí, el soluto A pasa al disolvente B. Ha de cumplirse la condición de que la solubilidad del componente A en el disolvente B sea mayor que la del líquido portador C. A su vez, el líquido portador C debería ser prácticamente insoluble en el disolvente B.

**Figura 8.**

*Esquema de la extracción líquido – líquido.*



**Nota.** La figura representa la extracción líquido -líquido en sus etapas. Tomado de: G. Hamburg, “Equipment for Engineering Education”, [En línea]. Disponible: [https://www.gunt.de/images/download/extraction\\_spanish.pdf](https://www.gunt.de/images/download/extraction_spanish.pdf). [Último acceso: 20 noviembre 2022].

La ilustración representada como ejemplo parte del planteamiento ideal en el que el soluto A es absorbido en su totalidad por el disolvente. En realidad, queda siempre un resto del soluto en el líquido portador. Además, se admite la insolubilidad total del líquido portador en el disolvente. En la práctica siempre se encontrarán trazas de cada una de las sustancias en la otra fase. El resultado es que en el proceso de separación real se forman dos fases después de la decantación:

- La fase extracto (principalmente A y B, restos de C)
- La fase refinado (principalmente C, restos de A y B)

Para obtener un soluto lo más puro posible, a continuación de la extracción se añade un paso más de separación, generalmente en forma de rectificación, en el que el disolvente se separa del soluto. El disolvente se puede reciclar, estando así disponible de nuevo para la extracción. [10]

Mientras que la destilación se aprovecha de las diferentes volatilidades –es decir, las diferentes distribuciones de un producto en las fases líquida y gaseosa–, la extracción líquido/líquido se base en distintas solubilidades –es decir, las diferentes distribuciones de un producto en 2 fases líquidas coexistentes.

### ***1.3.2. Requisitos del disolvente***

El disolvente deberá comprobarse con respecto a las siguientes características:

- Solubilidad máxima del producto en el disolvente
- Solubilidad mínima del disolvente en el refinado
- Solubilidad mínima del líquido de alimentación en el disolvente
- Separación rápida de fases del extracto desde el refinado
- Fácil separación del producto a partir del extracto/disolvente

Con el disolvente adecuado es posible realizar numerosas aplicaciones convenientemente mediante un proceso de extracción, tal como se describe a continuación. [13]

### ***1.3.3. Cuando utilizar el proceso de extracción***

El proceso de extracción líquido/líquido es conveniente para separaciones de:

- Productos de volatilidades similares
- Productos que forman azeótropos
- Productos cuya destilación requiere un gran consumo de energía
- Productos sensibles a la temperatura
- Productos no volátiles, tales como sales metálicas [13]

### ***1.3.4. Características del disolvente de extracción***

La extracción selectiva de un componente de una mezcla disuelta en un determinado disolvente se puede obtener al añadir otro disolvente que cumpla las siguientes condiciones.

- Que no se mezcle con el otro disolvente. El agua o una disolución acuosa suele ser uno de los disolventes implicados. El otro disolvente es un disolvente orgánico.



- Que el componente deseado sea mucho más soluble en el disolvente de extracción que en el disolvente original.
- Que los componentes sobrantes no se mezclen con el disolvente de extracción.
- Que sea volátil, para lograr que se pueda eliminar fácilmente del producto extraído por destilación o evaporación.
- Que no sea tóxico ni inflamable, sin embargo, hay pocos disolventes que cumplen estos criterios: existen disolventes relativamente no tóxicos pero inflamables como el hexano, otros no son inflamables, pero sí tóxicos como el diclorometano o el cloroformo, y otros son tóxicos e inflamables como el benceno [11].

#### **1.4. Absorción**

La absorción de gases es una operación en la cual una mezcla gaseosa se pone en contacto con un líquido, a fin de disolver de manera selectiva uno o más componentes del gas y de obtener una solución de éstos en el líquido [3].

La absorción es considerada el proceso más importante de purificación de gases, aparte de ser el más utilizado en la mayoría de los casos. Su costo es relativamente bajo y puede funcionar con una alta eficiencia sin necesidad de condiciones extremas. Esta operación es utilizada principalmente para recuperar o eliminar la sustancia que es absorbida por el líquido, y puede ser dividida en dos tipos: absorción física y absorción química [14].

La absorción física consta de la transferencia de masa del gas al líquido sin que ocurra una reacción entre las sustancias (Kohl et al., 1997). La concentración en el equilibrio de la sustancia absorbida está fuertemente ligada a la presión parcial de la misma en la fase gaseosa, por lo que se controla la temperatura y la presión en el sistema. Al no haber cambios en la naturaleza de las sustancias, el soluto puede luego ser recuperado del líquido mediante desorción, la operación opuesta a la absorción en la que la transferencia de masa se da de la fase líquida a la gaseosa. Esto además permite la reutilización del solvente [14].

La absorción química involucra la reacción entre el soluto y algún componente en el líquido, que puede ser tanto reversible como irreversible (Smith, 2005). A diferencia de la absorción física, la química no permite el uso de suposiciones básicas, lo que lleva a que su análisis sea mucho más

complejo. En algunos casos el comportamiento del equilibrio líquido-vapor no puede ser aproximado mediante la Ley de Henry, y si existen varias sustancias en el gas que reaccionan con el líquido pueden darse reacciones que compiten entre ellas, lo que elimina la opción de utilizar métodos simplificados como el de Kremser. Esto lleva en algunos casos a la necesidad de utilizar programas de computación avanzados para la simulación de estos procesos [14].

#### ***1.4.1. Elección del disolvente para la absorción***

- ***Solubilidad del gas.*** La solubilidad del gas debe ser elevada, a fin de aumentar la rapidez de la absorción y disminuir la cantidad requerida de disolvente. En general, los disolventes de naturaleza química similar a la del soluto que se va a absorber proporcionan una buena solubilidad [3].
- ***Volatilidad.*** El disolvente debe tener una presión baja de vapor, puesto que el gas saliente en una operación de absorción generalmente está saturado con el disolvente y, en consecuencia, puede perderse una gran cantidad [3].
- ***Costo.*** El disolvente debe ser barato, de forma que las pérdidas no sean costosas, y debe obtenerse fácilmente [3].
- ***Viscosidad.*** Se prefiere la viscosidad baja debido a la rapidez en la absorción, mejores características en la inundación de las torres de absorción, bajas caídas de presión en el bombeo y buenas características de transferencia de calor [3].
- ***Misceláneos.*** Si es posible, el disolvente no debe ser tóxico, ni inflamable, debe ser estable químicamente y tener un punto bajo de congelamiento [3].

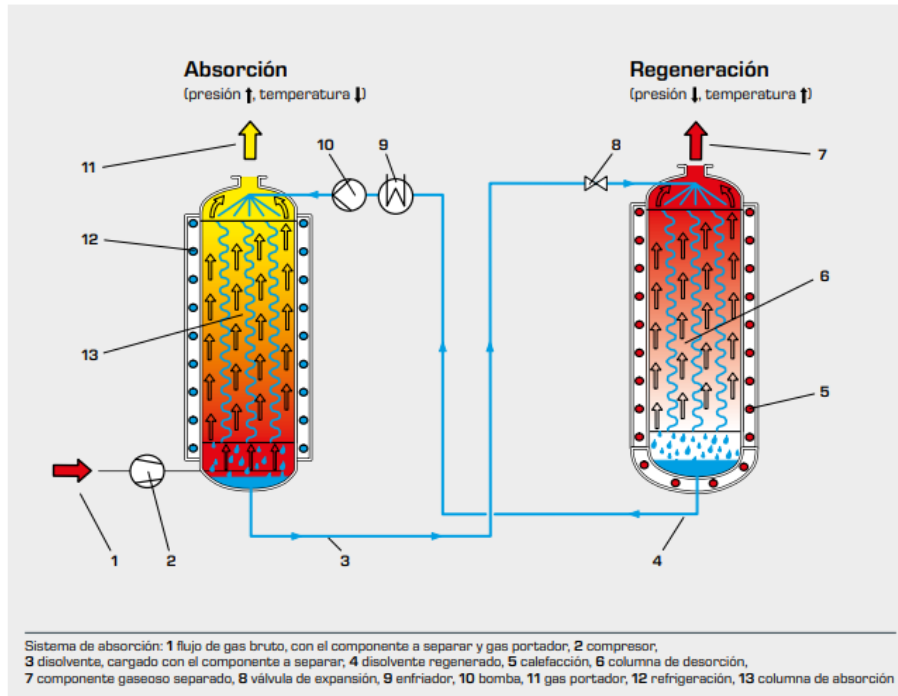
#### ***1.4.2. Generalidades del proceso de absorción***

La absorción se utiliza para eliminar uno o varios componentes de un flujo gaseoso utilizando un disolvente. La absorción puede perseguir diversos objetivos:

- Recuperar un componente gaseoso deseado.
- Eliminar un componente gaseoso no deseado. Se puede tratar, por ejemplo, de la eliminación de una sustancia nociva de un flujo de gases residuales.
- Obtención de un líquido; un ejemplo sería la producción de ácido clorhídrico por absorción de HCl gaseoso en agua. En la absorción participan por lo menos tres sustancias: el componente gaseoso a separar (adsorbato), el gas portador y el disolvente (absorbente) [15].

**Figura 9.**

*Esquema del proceso de absorción.*



**Nota.** La figura representa las etapas del proceso de absorción. Tomado de: G. Hamburt, "Ingeniería de procesos térmicos Absorción y adsorción", [En línea]. Disponible: [https://www.gunt.de/images/download/absorption\\_spanish.pdf](https://www.gunt.de/images/download/absorption_spanish.pdf). [Último acceso: 21 noviembre 2022].

Según la naturaleza del componente gaseoso a separar, tiene que emplearse un disolvente que disuelva selectivamente dicho componente. En este caso, selectivamente significa que el disolvente absorbe principalmente el o los componentes a separar, y no el gas portador. Presiones elevadas y temperaturas bajas favorecen la absorción. Dependiendo del tipo del disolvente, el gas se absorbe por disolución física (absorción física) o por reacción química (absorción química) [15].

Para separar los componentes gaseosos del disolvente, la etapa de absorción va seguida, en la mayoría de los casos, de una etapa de desorción para regenerar el disolvente. En la etapa de desorción se reduce, por efecto de temperaturas elevadas o presiones bajas, la solubilidad de los gases en el disolvente, eliminándolos del mismo. Por tanto, se puede reutilizar el disolvente, que se devuelve al circuito [15].

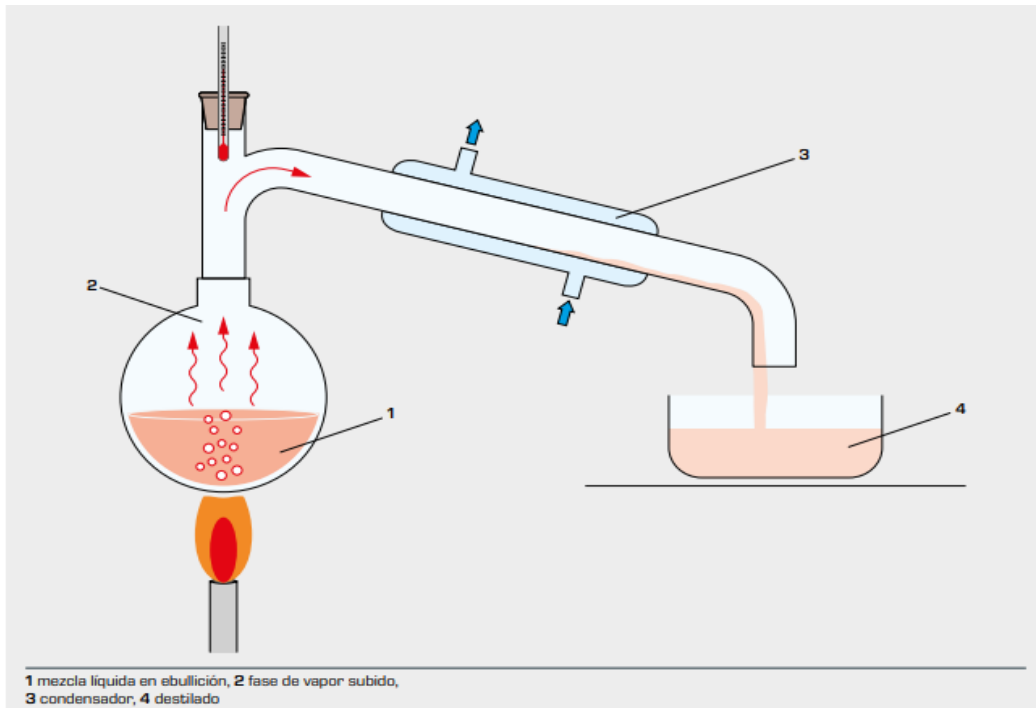
## 1.5. Destilación

La destilación es un método para separar los componentes de una solución; depende de la distribución de las sustancias entre una fase gaseosa y una líquida, y se aplica a los casos en que todos los componentes están presentes en las dos fases [3].

La destilación es una operación básica con la que se pueden separar mezclas líquidas homogéneas. El proceso aprovecha las diferentes volatilidades de los componentes de la mezcla a separar. Se conoce como volatilidad la tendencia de una sustancia a pasar de la fase líquida a la gaseosa. Ejemplos de líquidos muy volátiles son la acetona, el alcohol y la gasolina [16].

**Figura 10.**

*Principio de destilación.*



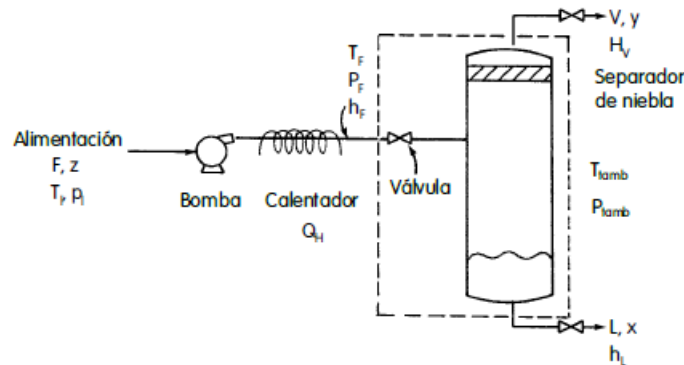
**Nota.** La figura representa el proceso básico de destilación. Tomado de: G. Hamburg, "Ingeniería de procesos térmicos Destilación/rectificación", [En línea]. Disponible: [https://gunt.de/images/download/distillation\\_rectification\\_spanish.pdf](https://gunt.de/images/download/distillation_rectification_spanish.pdf). [Último acceso: 21 noviembre 2022].

### 1.5.1. Destilación simple

La destilación instantánea o *flash* consiste en la vaporización de una fracción definida del líquido, en una manera tal que el vapor que se forma está en equilibrio con el líquido residual, separando el vapor del líquido y condensando el vapor [11].

**Figura 11.**

*Diagrama de destilación simple.*



**FIGURA 2-1. SISTEMA DE DESTILACIÓN INSTANTÁNEA.**

**Nota.** La figura representa el proceso de destilación simple. Tomado de: P. C. Wankat, Ingeniería de procesos de separación., 2ª. Ed. México: Pearson Education Inc., 2009.

### 1.5.2. Destilación continua

La destilación continua, también llamada fraccionada, se basa en una alimentación controlada y continua de la mezcla a separar. Una vez que la mezcla entra en la columna se produce la separación continua de los componentes, la fracción ligera sale por la parte superior de la columna y la fracción pesada deja la columna por el fondo. En este tipo de destilación, la composición de los productos a ser separados permanece constante en cada sección de la columna, motivo por el cual se utiliza una corriente llamada reflujo, que es una recirculación del líquido extraído desde el tope. Aprovechando la evaporación y la condensación sucesiva en la extracción, se obtienen los productos destilados con características definidas previamente en el diseño del equipo [18].

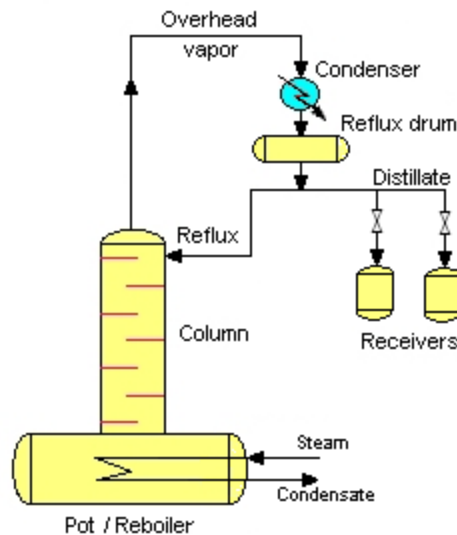
### 1.5.3. Destilación batch

Este tipo de destilación es de lejos la forma más antigua utilizada para lograr la separación de una mezcla de compuestos. Su uso ha aumentado en los últimos años, debido a los cambios en las tendencias de la industria, que se ha movido en la dirección de la producción de compuestos con valor agregado y fabricación de pequeños volúmenes de sustancias químicas y bioquímicas con

características especiales. El éxito de la destilación por lotes como método de separación se debe principalmente a su flexibilidad y versatilidad utilizando solo una columna o, en casos que lo requieran, varias columnas batch en serie. Estos atributos son esenciales para una respuesta rápida a una demanda del mercado caracterizado por productos con una corta duración de vida y con requisitos específicos [18].

**Figura 12.**

*Representación de la destilación batch.*



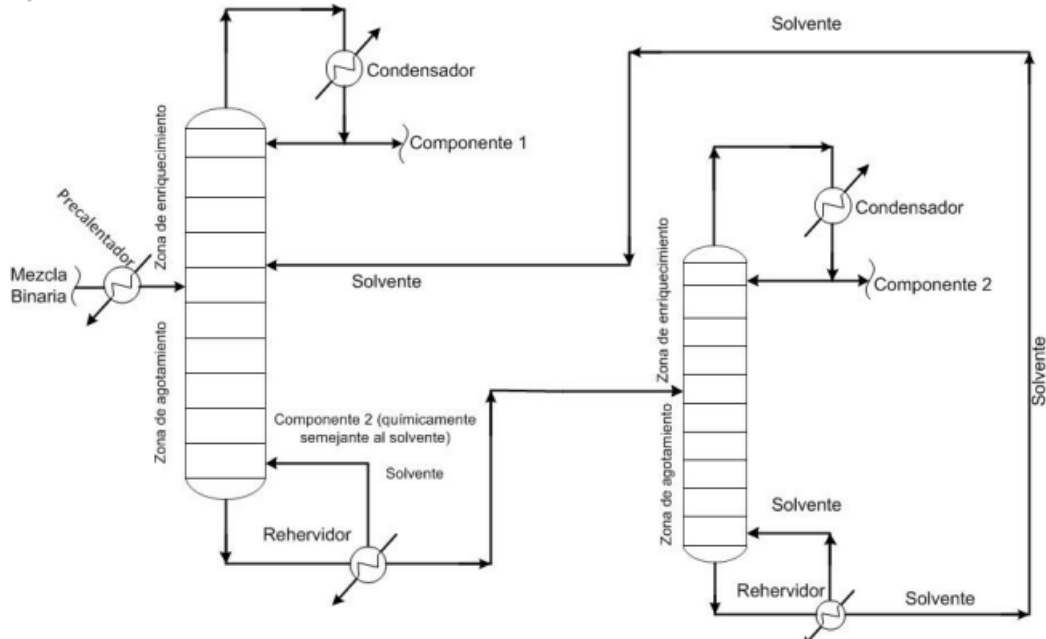
**Nota.** La figura representa el proceso de destilación batch. Tomado de: P. C. Wankat, Ingeniería de procesos de separación., 2ª. Ed. México: Pearson Education Inc., 2009.

#### **1.5.4. Destilación extractiva**

Destilación extractiva. Una destilación extractiva consiste en la adición de un tercer componente a una mezcla binaria que presente o no comportamiento azeotrópico, esto con el fin de modificar la volatilidad relativa de los componentes que constituyen la mezcla. Este puede ser un solvente miscible en uno o los dos componentes de la mezcla o puede poseer un punto de ebullición elevado, pero también debe ser químicamente semejante a uno de los componentes de la mezcla [15]

**Figura 13.**

*Representación de la destilación extractiva.*



**Nota.** La figura representa el proceso de destilación extractiva. Tomado de: P. C. Wankat, Ingeniería de procesos de separación., 2ª. Ed. México: Pearson Education Inc., 2009.

### 1.5.5. Destilación azeotrópica

Un azeótropo se define como el equilibrio donde las composiciones en las dos fases (líquido y vapor) son iguales, de tal modo que, no es posible obtener una mayor pureza en el componente deseado. Por lo tanto, se convierte en una operación difícil de realizar debido a que los dos componentes tienen aproximadamente el mismo punto de ebullición. Este tipo de mezclas pueden ser separadas añadiendo un solvente que forme un azeótropo con un componente de la mezcla llamado componente clave y así facilitar la separación, estos solventes generalmente reciben el nombre de arrastrador[15].

### 1.5.6. Aplicaciones

- Aplicación de la destilación flash.

Una aplicación de una destilación flash la podemos encontrar en el proceso de obtención de éster metílico y glicerina: esta separación se aplica en una parte del proceso denominada purificación de éster metílico/destello de metanol. En esta se alimenta una mezcla que contiene el biodiesel,

metanol y agua a una cámara de destilación flash y se logra la separación del éster metílico que sale por el fondo y es enviado a su almacenamiento mientras que la mezcla metanol-agua sale por la parte superior y se envía a la unidad de rectificación de metanol.

- Aplicación de la destilación azeotrópica.

Una aplicación muy común de la destilación azeotrópica es en la purificación de ácido acético en la mezcla ácido acético-agua, en esta se le agrega un solvente que genere un azeótropo con el agua presente permitiendo alcanzar la concentración deseada y así facilitar la separación, obteniendo un producto de alta pureza que necesitaría demasiadas etapas teóricas por una destilación convencional (Perry, 2001).

- Aplicación de la destilación extractiva.

Una aplicación industrial de la destilación extractiva es el caso de la separación de tolueno de hidrocarburos parafínicos (grupo de hidrocarburos que tienen por fórmula general " $C_nH_{2n+2}$ ", donde n es el número de átomos). Ambos compuestos tienen pesos moleculares muy parecidos y es muy difícil separarlos debido a su volatilidad relativamente baja. A pesar de eso, es necesario recuperar el tolueno a partir de ciertas mezclas de hidrocarburos del petróleo. Como hidrocarburo parafínico se toma el iso-octano (punto de ebullición  $93^\circ C$ ). El iso-octano es más volátil que el tolueno (punto de ebullición  $110,8^\circ C$ ). En presencia de fenol (punto de ebullición  $181,4^\circ C$ ) la volatilidad relativa del iso-octano aumenta, de forma que la separación del tolueno es relativamente sencilla con aproximadamente 83 % en mol de fenol en el líquido.

## **1.6. Seguridad de procesos**

La seguridad de procesos permite mediante la aplicación de buenas prácticas de diseño, ingeniería, operación y mantenimiento, gestionar la integridad de los equipos y manejo de sustancias peligrosas en los procesos. De esta forma, se encarga de la prevención y control de situaciones que tiene el potencial de provocar efectos tóxicos, incendios o explosiones que deriven en afectaciones a las personas, medio ambiente, reputación y economía de la empresa [19].

La implementación de la seguridad de procesos permite a una organización reducir la frecuencia y gravedad de los incidentes, mejorando su desempeño comercial, ambiental y de seguridad a largo plazo. Según el CCPS (Center for Chemical Process Safety) todas las industrias que fabrican, consumen o manipulan productos químicos peligrosos o energía deben realizar diferentes consideraciones como:



- Desarrollar su enfoque de prevención de accidentes partiendo desde el cumplimiento de una estrategia basada en riesgos.
- Mejorar continuamente la eficacia del sistema de gestión implementado.
- Mediante los principios de diseño basados en riesgo emplear la gestión de la seguridad de los procesos.
- Concentrar sus recursos en las actividades de mayor riesgo.

Las principales causas de los incidentes de procesos químicos se pueden agrupar en una o más de las siguientes categorías: fallos tecnológicos, fallos humanos, fallos del sistema de gestión, circunstancias externas y fenómenos naturales . Debido a esto, las industrias han evolucionado varios enfoques para prevenir accidentes y pérdidas de productos químicos como se evidencia en la figura 2. [19]

**Figura 14.**

*Evolución de las estrategias de seguridad de procesos y prevención de accidentes/ pérdidas.*



**Nota.** La figura representa la evaluación de estrategias de seguridad de procesos y prevención de accidentes. Tomado de: M. S. Vargas Jiménez y M. Espitia Velandia, “Propuesta de un plan de gestión de riesgo en el centro de procesos e innovación para la industria sostenible (CEPIIS) de la Universidad de América utilizando las herramientas de análisis de riesgo what if, hazop y la metodología bow-tie”, Bogotá D.C. Fundación Universidad de América, 2022. [PDF]. Disponible: <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/9033> [Último acceso: 21 noviembre 2022].

### **1.6.1. What if**

La técnica del análisis “What-If” es una metodología que se lleva a cabo por medio de una lluvia de ideas en la cual un grupo de gente experimentada familiarizada con el proceso en cuestión realiza preguntas sobre ciertos eventos indeseables que se pueden presentar en el proceso. Este concepto de análisis “¿Qué pasa sí?” motiva a que el grupo de evaluación de riesgos se pregunte situaciones que comiencen con la frase “Qué pasa sí” [19].

Para aplicar esta herramienta de análisis, normalmente una persona encargada escribe todas las preguntas en una hoja de registro o procesador de palabras. Las preguntas pueden referirse a

cualquier condición anormal relacionada con la planta, no sólo con fallas en los equipos, componentes o variaciones del proceso. Posteriormente las preguntas son divididas en diferentes áreas de investigación, como seguridad eléctrica, protección contra incendios, seguridad personal, entre otros. Cada área es analizada por un grupo o por una o más personas con los conocimientos suficientes para realizar esta labor.

El propósito de esta herramienta es la identificación de riesgos, situaciones riesgosas, o eventos accidentales específicos que pudiesen producir una consecuencia indeseable en el proceso. Un grupo experimentado de personas identifica posibles situaciones de accidente, sus consecuencias, protecciones existentes, y entonces sugieren alternativas para la reducción de los riesgos. [19]

### ***1.6.2. Hazop***

Es una técnica de identificación de peligros y problemas operativos en una instalación industrial. HAZOP es una abreviatura que hace referencia al análisis de “HAZard” (Peligro) y “OPerability” (operabilidad) [16]. Además, se considera que es un examen formal y sistemático de una planta de procesamiento con el fin de determinar posibles desviaciones en el diseño y/o la operación de una instalación nueva o existente, identificando peligros, fallas y problemas de operatividad, para así, evaluar las consecuencias de un mal funcionamiento. Un análisis HAZOP no solo se concentra en temas de seguridad, sino que también trata de descubrir problemas de “operabilidad” que podrían dar lugar a malos resultados económicos. Ejemplos de problemas de operabilidad podrían ser excesivas operaciones manuales que retrasen la producción, la falta de material suficiente para permitir un inicio, y dispositivos de medición adecuados para permitir que el personal de la planta pueda supervisar y diagnosticar posibles incidentes antes de que ocasionen daños al equipo o grandes pérdidas económicas [19].

Si bien el método HAZOP se desarrolló originalmente para el diseño de procesos, hoy en día suele ser utilizado para revisiones periódicas de seguridad de plantas y experimentos existentes, que contempla a un equipo multidisciplinario que colabora en el análisis, y casi todos los ingenieros químicos para participar en estudios HAZOP de diseños, plantas existentes o equipos experimentales. En esencia el procedimiento del estudio HAZOP se inclina por investigar todas las desviaciones significativas de una operación de caso base para determinar (a) los posibles peligros, (b) las consecuencias de cada peligro, y (c) modificaciones con el objetivo de eliminar o reducir la probabilidad del peligro. El procedimiento asume tácitamente que una operación de base

segura y operable es conocida; sin embargo, la operación de base también debe ser evaluada durante el análisis HAZOP [19].

### ***1.6.3. Bow-tie***

La metodología Bow-Tie permite dar una mejor descripción de la situación actual en donde ciertos riesgos están presentes, de esta forma las personas pueden entender más fácilmente la relación entre los riesgos y los eventos que se pueden presentar, ya que describe las relaciones entre las amenazas o causas, barreras, factores de escalabilidad, controles, consecuencias, medidas de recuperación y tareas críticas de seguridad. Esta metodología resulta de la combinación de dos diferentes técnicas, un árbol de fallas analizando las causas de un evento y un árbol de eventos analizando las consecuencias [19].

## **1.7. RESPEL**

Es aquel residuo o desecho que, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas, pueden causar riesgos, daños o efectos no deseados, directos e indirectos, a la salud humana y el ambiente. Así mismo, se considera residuo peligroso a los empaques, envases y embalajes que estén en contacto con ellos [20].

Debido a la naturaleza de los diversos residuos y a sus propiedades fisicoquímicas, éstos se deben clasificar de acuerdo con el decreto 4741 de 2005. Las características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radioactivas causan alteraciones en la salud y el ambiente, también debe considerarse como RESPEL a los envases, empaques y embalajes que se encontraran en contacto con sustancias de dichas características [20].

La proyección de residuos o desechos peligrosos en los diferentes espacios de trabajo del CEPIIS abarca un espectro muy amplio en cuanto a las diferentes unidades de proceso que se tendrán instaladas en la planta piloto propuestas por PS+E. En cada proceso se manipularán diferentes residuos con una complejidad por equipo; teniendo en cuenta lo anterior, se tomará el listado de sustancias a trabajar en el CEPIIS, el cual se ha seleccionado con el equipo directivo en conjunto con el colaborativo estudiantil del proyecto.

Por esta razón la proyección de residuos se realizará con las sustancias que se llegarán a usar en cada una de las operaciones unitarias encontradas dentro del CEPIIS y de esta manera generalizar un comportamiento riguroso referente a los desechos que se llevarán a pretratamiento o a una disposición final [20].

## 2. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS

### 2.1. Secador de bandejas

**Figura 15.**

*Secador de bandejas del Centro de purificación y refinación (CEPURE).*



**Nota.** En la figura se evidencia una fotografía del secador de bandejas del Centro de purificación y refinación (CEPURE). Tomado de [“PRODUCTOS Y SERVICIOS |PROCESS SOLUTIONS ANDEQUIPMENT.”<https://andreaorjuela.wixsite.com/website/productos-y-servicios> (accessed Nov. 06, 2022)]

El secador de bandejas desarrollado por PS+E está compuesto por una cámara de secado con un sistema de bandejas construido en acero Inox 304, un ventilador de velocidad variable, un sistema de adecuación de humedad del aire, un conjunto de resistencias para el calentamiento del aire, celdas de carga para seguimiento del peso del sólido a secar, y un sistema de ductos con recirculación para el aire. El equipo es robusto, durable, y recubierto con aislamiento térmico. Este puede ser empleado para actividades de docencia, investigación y extensión en el secado de una gran variedad de productos, entre los que se puede mencionar alimentos, minerales, biomasa, etc.

- **Ventilador.**

El sistema de secado cuenta con un ventilador centrífugo capaz de proveer 500 pies cúbicos de aire por minuto con una presión estática de 1 pulgada de columna de agua. El sistema de toma de aire cuenta con un filtro para prevenir la contaminación por partículas o microorganismos. El ventilador cuenta con un variador de velocidad para regular el flujo de aire de secado.

- **Sistema de adecuación de humedad.**

El equipo cuenta con un reservorio de agua el cual se encuentra ubicado previo a las resistencias de calentamiento. El reservorio alimenta una bomba que lleva el agua a un sistema de aspersión ubicado en la parte superior del reservorio sobre la línea de entrada de aire. Los aspersores permiten controlar la humedad del aire de entrada al proceso de secado.

- **Sistema de calentamiento.**

El aire es calentado empleando un sistema de resistencias capaz de proveer una potencia máxima de 6.75 KW. Las resistencias están ubicadas a la salida del ventilador y cuentan con un regulador de potencia que permite controlar la temperatura del aire de alimentación.

- **Cámara de secado.**

La cámara de secado está construida en acero Inox 304, con aislamiento térmico. La puerta frontal de la cámara cuenta con un vidrio para el seguimiento visual del proceso. Al interior del secador se encuentra un sistema de 3 bandejas cuadradas removibles. Las bandejas están ubicadas sobre un soporte acoplado a celdas de carga. Las bandejas están construidas en malla tejida de acero inoxidable. Dentro la cámara de secado se encuentra un sensor de temperatura.

El equipo cuenta con ductos de aire en las paredes superior e inferior, y en las paredes laterales de la cámara. Así mismo, cuenta con sensor de temperatura y humedad para el aire ambiente, para el flujo de aire alimentado a la cámara, y para el aire a la salida de la cámara de secado. El sistema cuenta con un anemómetro ubicado sobre el ducto de salida, para la medición de la velocidad del aire.

- **Instrumentos de medición.** La unidad cuenta con los instrumentos adecuados para la medición de temperatura, humedad y velocidad del aire. Para la temperatura y la humedad se emplean 4 termohigrómetros y una termocupla. La velocidad del aire a la salida de la cámara de secado se mide con un anemómetro.

**Tabla 1.**

*Instrumentación del secador de bandejas*

TH-01	Temperatura y humedad del aire antes del calentamiento
TH-02	Temperatura y humedad del aire después del calentamiento
TI-03	Temperatura en la cámara de secado
TH-04	Temperatura y humedad del aire a la salida de la cámara de secado
TH-05	Temperatura y humedad del aire alimentado al sistema

**Nota.** En la tabla se muestra la instrumentación que tiene el secador de bandejas. Tomado de: PSE, *MANUAL DE OPERACIÓN SECADOR DE BANDEJAS*, 2018.

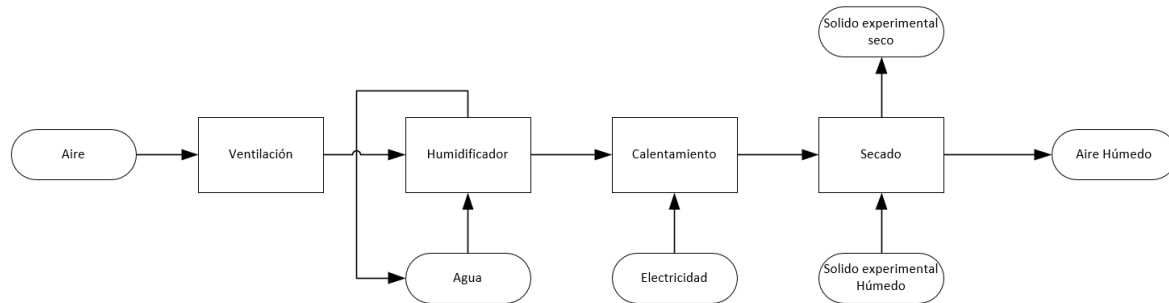
- **Tablero de control.**

El panel de control incorpora todos los componentes eléctricos y electrónicos de la unidad, entre los que se encuentran el PLC, relés, fusibles, variadores de frecuencia, así como todos los elementos de control. El tablero incluye un botón de parada de emergencia, un interruptor para encendido, un bombillo testigo de encendido y una pantalla HMI. A través del panel de la pantalla, el usuario puede controlar la temperatura, el flujo y la humedad del aire. Así mismo es posible supervisar las variables de proceso, como el peso de la muestra a lo largo del experimento [21].

### 2.1.1. Diagrama BFD del proceso de secado

Figura 16.

Diagrama BFD procesos de secado



**Nota.** En la figura se muestra el diagrama BFD del proceso de secado.

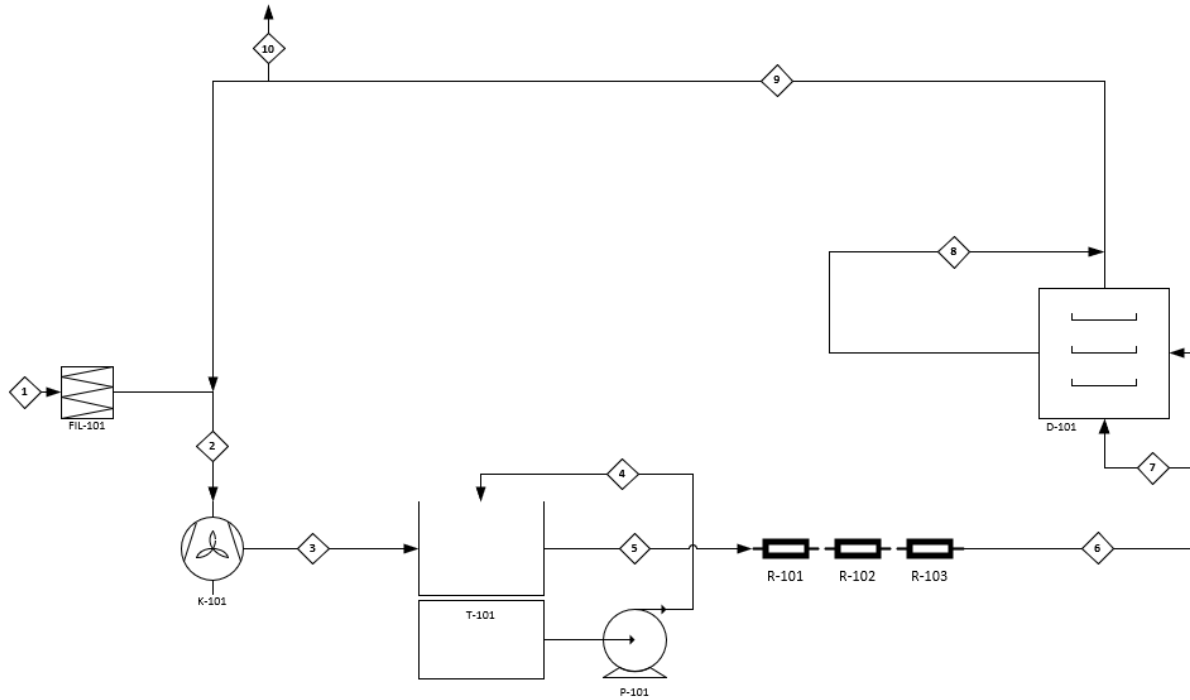
- **Descripción del BFD operación de secado**

El proceso consiste en regular el flujo de aire a través de un proceso de ventilación, sigue un proceso para adecuar la humedad del aire, si se requiere en donde ingresa agua, pasa por un proceso de calentamiento para adecuar la temperatura del flujo de aire. El flujo ingresa a la operación de secado en donde encontramos el material al cual le retiraremos la humedad. Por último, sale el flujo de aire húmedo.

### 2.1.2. Diagrama PFD del proceso de secado

Figura 17.

Diagrama PFD del proceso de secado



FIL-101	K-101	T-101	P-101	D-101
Filtro de aire	Ventilador centrifugo	Tanque de aspersión	Bomba centrifuga	Secador de bandejas

**Nota.** En la figura se muestra el diagrama PFD del proceso de secado.

#### • Descripción del PFD operación de secado

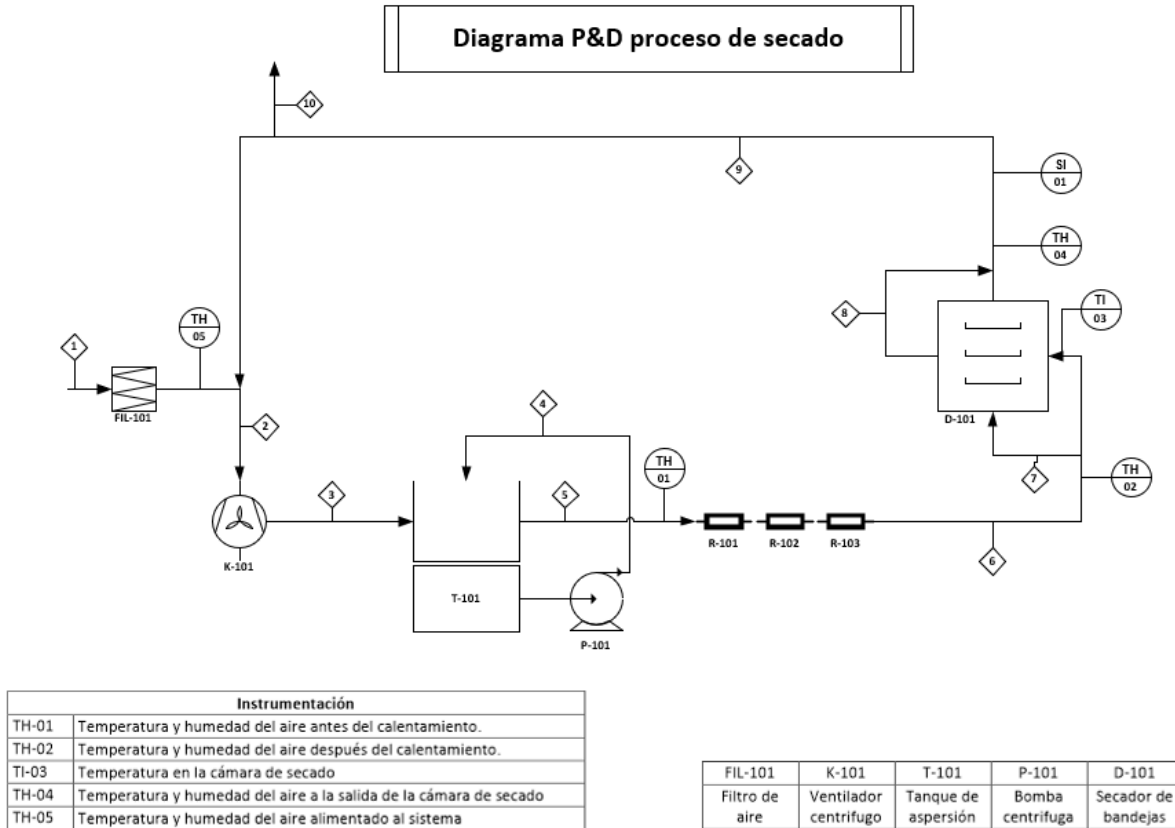
Encontramos una corriente que pasa por un filtro (F-101) para retirar partículas en el aire, el flujo pasa por un ventilador (K-101) que controla el flujo de aire del sistema, pasa al sistema de humidificación que está compuesto por un tanque reservorio (T-101), con aspersores en la parte superior y una bomba de dosificadora (P-101) que regula el flujo de agua, pasa a unas resistencias (R-101) que permiten ajustar la temperatura del flujo de aire. En la cámara (D-101) de secado el flujo puede pasar a través de ductos de forma horizontal o vertical. Por último, una línea de salida o recirculación del flujo de aire.



### 2.1.3. Diagrama P&D del proceso de secado

Figura 18.

Diagrama P&D del proceso de secado



Nota. En la figura se muestra el diagrama P&D del proceso de secado.

#### • Descripción del P&D operación de secado

El proceso comienza en la corriente por la cual el flujo de aire ingresa, pasa por un filtro de aire (FIL-101), hasta llegar al ventilador K-101, durante este paso encontramos un termohigrómetro (TH-05). El flujo pasa al sistema de humificación, compuesto por un tanque (T-101) y una bomba (P-101), en donde a la salida encontramos un termohigrómetro (TH-01) para verificar temperatura y humedad del flujo, antes de pasar por las resistencias (R-101). Un tercer termohigrómetro (TH-02) se encuentra en la entrada de la cámara de secado D-101, la cámara cuenta con una termocupla para el control de la temperatura (TI-03), el flujo de salida de la cámara tiene un termohigrómetro (TH-04) y un anemómetro (SI-01) que mide la velocidad del flujo.

### 2.1.4. Tabla de parámetros y variables secador de bandejas

Tabla 2.

Tabla de Parámetros y variables por equipo del secador de bandejas

Equipo	Código	Parámetro	Descripción	Variables	Descripción	Rangos de operación
Ventilador	K-101	Flujo de aire	Circulación del aire en unidad de tiempo	Velocidad del aire	Regulación de la rapidez del flujo de aire	500 ft <sup>3</sup> de aire por minuto con una presión estática de 1 pulgada.
Tanque de aspersión	T-101	Flujo de agua	Control de la humedad del aire en la entrada del proceso de secado	Caudal	Control de la cantidad de fluido que circula en el proceso por unidad de tiempo	—
Bomba dosificadora	P-101	Flujo del agua	Regulación de la cantidad de agua que ingresa al tanque de aspersión	Caudal	Control de la cantidad de fluido que circula en el proceso por unidad de tiempo	—
		—	—	Dosificación	Distribución equitativa del fluido	Dos frecuencias de dosificación (0-20% o 0-100%)
Reservorio de agua	T-101	Volumen de agua	Espacio destinado para el almacenamiento del fluido	—	—	mínimo 10 cm de profundidad
Resistencias	R-101	Temperatura del aire	Energía que libera el aire	Temperatura	Control de la energía liberada en el proceso	variable según criterio
		Área de Transferencia de calor	Espacio destinado para transferir energía en forma de calor	Potencia	Control de la energía aplicada por unidad de tiempo	potencia máxima de 6.75 KW
Cámara de secado	D-101	Flujo de aire	Circulación del aire en unidad de tiempo	Dirección del flujo de aire	Horizontal o transversal	—

		Contenido de humedad	Presencia de agua	Temperatura de bulbo húmedo	Control de la temperatura más baja alcanzable evaporando el agua	—
		—	—	Temperatura de bulbo seco	Control de la temperatura sin factores secundarios	—
		—	—	Tiempo de secado	Duración de la remoción de humedad	—

**Nota.** En la tabla se muestra los parámetros y variable de cada uno de los equipos de secador de bandejas.

En esta tabla encontramos los parámetros y variables por equipo en el secador de bandejas, así como la descripción y los rangos de operación. Las líneas en la tabla indican la información que no se tiene en el momento del equipo. Por lo que se recomienda una caracterización de estas características.

### **2.1.5. Caracterización del equipo**

El secador de bandejas carece de información de algunas propiedades y especificaciones en sus equipos por lo que se plantea una caracterización en cada uno de sus sistemas:

- **Sistema de ventilación**

Para la caracterización del sistema de ventilación es necesario identificar o conocer las siguientes características y propiedades enunciadas a continuación:

- Material o materiales en los que se encuentra construido el ventilador.
- Área de la boca de entrada y salida del ventilador.
- Determinar si el ventilador es axial o centrífugo.
- Número de revoluciones por minuto (rpm) del giro del rotor del ventilador.
- Calcular el rendimiento del ventilador.
- Máximo flujo volumétrico capaz de suministrar el ventilador.
- Material del filtro de aire (Nylon, metal, carbón activado, etc.).
- Área del filtro.

- **Sistema de adecuación de humedad.**

para la caracterización del sistema de ventilación es necesario identificar o conocer las siguientes características y propiedades enunciadas a continuación:

- Identificar los materiales en los cuales se encuentra construida la bomba.
- Indicar el valor nominal de la presión (presión de trabajo para la cual está diseñada la bomba).
- Calcular el rendimiento y el caudal.

- **Sistema de calentamiento.**

Para la caracterización del sistema de ventilación es necesario identificar o conocer las siguientes características y propiedades enunciadas a continuación:

- Materiales de construcción
- Área superficial de la resistencia.
- Tipo de resistencia.

## 2.2. Planta de extracción sólido-líquido y líquido-líquido

**Figura 19.**

*Extracción líquido-líquido y sólido-líquido del Centro de purificación y refinación (CEPURE).*



**Nota.** La figura representa una fotografía del extractor líquido-líquido y sólido-líquido del Centro de purificación y refinación (CEPURE). Tomado de ["PRODUCTOS Y SERVICIOS | PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT." <https://andreaorjuela.wixsite.com/website/productos-y-servicios> (accessed nov. 06, 2022)]

La planta de extracción sólido-líquido PESL está compuesta por el sistema de calentamiento, el sistema de extracción, el condensador, el sistema de concentración del extracto, los tanques colectores de solvente, el sistema de vacío, y el tablero de control. El equipo permite realizar el proceso de extracción, la concentración del extracto y la recuperación del solvente, tanto en operación por lotes como en continuo. El equipo es robusto, durable, construido en acero inoxidable 304 con acabado brillante. Puede ser utilizado para una gran diversidad de aplicaciones de extracción con solventes y para actividades de docencia, investigación, y extensión.

- **Tanque de fluido calefactor.**

Tanque en acero inoxidable con capacidad de 50 L aislado con fibra de vidrio. El fluido calefactor es un aceite térmico que se calienta por acción de 3 resistencias de inmersión fabricadas en acero inox. El fluido se hace circular por la chaqueta del extractor o del tanque de concentración de

extracto. El tanque de aceite térmico cuenta con un arreglo de válvulas de nivel visible externo en 1/2”, purga inferior en línea de 1/2”, válvula de alivio en 1/2”, conexión para termocupla y válvulas de carga y retorno de 1/2”.

El aceite térmico provisto con el equipo es de tipo parafínico de alta estabilidad térmica, cuyas propiedades se describen a continuación.

**Tabla 3.**

*Especificación del aceite térmico*

<b>Características del aceite térmico</b>	
Viscosidad a 40 °C, cSt	32.0
Índice de viscosidad	95
Punto de inflamación, °C	225
Gravedad API	0.88

**Nota.** En la tabla se muestra la instrumentación del extractor solido- líquido y líquido – líquido. Tomado de: PSE, MANUAL DE OPERACIÓN PLANTA DE EXTRACCIÓN SÓLIDOLÍQUIDO Y LÍQUIDO-LÍQUIDO, 2018.

El tanque cuenta con una bomba centrífuga para la circulación de aceite a través del percolador y el concentrador. Esta puede dar un caudal máximo de 19 L/min y una altura manométrica hasta 16 m. La temperatura de operación del líquido está en el intervalo de -10 °C hasta 130 °C. El diámetro de succión es de 3/4” NPT y descarga 3/4” NPT. La bomba tiene 0.5 hp de potencia y tensión 110 V-120 V.

- **Percolador agitado.**

Tanque cónico truncado de acero inoxidable 304 con capacidad de 20 L aislado con fibra de vidrio. El tanque cuenta con chaqueta de calentamiento por donde circula el aceite térmico. Cuenta con una tapa con tornillos abatibles, sobre la cual está montada una línea de carga de 1/2” con válvula de bola, una conexión para salida de vapores hacia el condensador, una para retorno de solvente, otra para alivio atmosférico con válvula de bola, una conexión para termocupla y un moto-reductor de 0.34 hp, torque 18 Nm, conexión 220V/240V, relación de reducción 15:1 y 115 rpm. El tanque cuenta con un sistema de pivote con tres posiciones para facilitar la descarga de sólidos. En la parte inferior cuenta con purga inferior en línea de 1/2”, un visor de vidrio y válvula para toma de muestras.

- **Condensador.**

Intercambiador de coraza y tubos, con arreglos tipo TEMA, construidos en acero inoxidable 304. Opera con fluido de refrigeración por la coraza con conexión de entrada y salida de 1/2". Para la corriente de proceso el equipo cuenta con conexiones de entrada y salida de 1/2" y sensores de temperatura en cada una de ellas. El equipo además incluye dos conexiones de 1/2" con válvula de bola para el desagüe de condensados.

- **Visor de condensación.**

Visor construido en vidrio con capacidad de 1 L. Tiene conexión superior de alivio y de entrada de fluido del proceso desde el condensador. En la parte inferior tiene conexión de recirculación al percolador, toma de muestras y conexión hacia los tanques colectores.

- **Concentrador.**

Tanque en acero inoxidable con capacidad de 20 L aislado con fibra de vidrio. El tanque cuenta con chaqueta de calentamiento por donde circula el aceite térmico. Cuenta con una tapa flanchada removible con empaque y tornillos en acero inoxidable, sobre la cual está montada la línea de carga de 1/2", una conexión para salida de vapores hacia el condensador, conexión desde el percolador, alivio atmosférico y una conexión para termocupla. Cuenta con un arreglo de válvulas de nivel visible externo en 1/2". En la parte inferior cuenta con purga inferior en línea de 1/2" y válvula para toma de muestras. Ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable. El concentrador cuenta con un desflemador para prevenir la formación de espuma.

- **Tanques colectores de solvente.**

Tanques cilíndricos simétricos de acero inoxidable, con capacidad para almacenar 10 L cada uno. Cada tanque cuenta con un arreglo de válvulas de nivel visible externo en 1/2", purga inferior en línea de 1/2" con válvula de bola, y una tapa flanchada removible con empaque y tornillos en acero inoxidable. Sobre la tapa están montados: una válvula de bola de 1/2" para alivio atmosférico, una línea de entrada con válvula de bola de 1/2", y un acople a línea de vacío. Ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable.

- **Trampa de vacío.**

Tanque cilíndrico en acero inoxidable con serpentín interno de 1/2". Trampa fría para remoción de gases condensables y protección de la bomba de vacío. El tanque se carga con hielo y agua, que actúa como medio de enfriamiento para los gases condensables. La espiral y el tanque cuentan con purga inferior en línea de 1/2" con válvula de bola. Ménsulas de soporte a la estructura en acero

inoxidable. El sistema cuenta con una bomba de diafragma con capacidad para remover 70.3 L/min y una presión mínima de 0.15 bar. La bomba tiene 0.2 hp ,220V ,60 Hz, tensión monofásica.

- **Sensores de temperatura y presión.**

Las temperaturas en el sistema son monitoreadas con 5 termocuplas tipo K, e identificadas sobre el tablero de control.

**Tabla 4.**

*Instrumentación del extractor solido- líquido y liquido – liquido*

T-01	Temperatura del fluido calefactor
T-02	Temperatura del extractor
T-03	Temperatura del concentrador
T-04	Temperatura entrada del condensador
T-05	Temperatura salida del condensador
P-01	Presión del tanque concentrador
P-02	Presión del sistema de vacío

**Nota.** En la tabla se muestra la instrumentación del extractor solido- líquido y liquido – liquido. Tomado de: PSE, MANUAL DE OPERACIÓN PLANTA DE EXTRACCIÓN SÓLIDOLÍQUIDO Y LÍQUIDO-LÍQUIDO, 2018.

- **Tablero de control.**

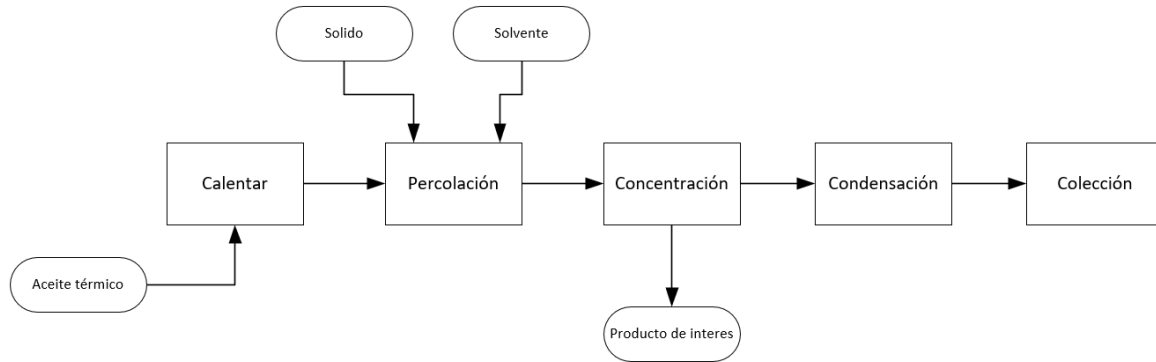
Unidad de manejo y encendido de los indicadores de temperatura, el control de temperatura del aceite térmico, la bomba de recirculación de fluido de calefactor, las resistencias del fluido calefactor, la bomba de vacío y el sistema de encendido del motor de agitación y variador de velocidad. Cuenta con indicadores de temperaturas, botones para energización del sistema, encendido bombas, encendido del variador de velocidad del agitador y encendido de resistencias. Cuenta con bombillos testigo de energización y un botón de parada de emergencia. Lateralmente cuenta con una toma corriente de 110V para conexión de equipos externos [22].



### 2.2.1. Diagramas extracción sólido - líquido

Figura 20.

Diagrama de BFD del proceso de Extracción sólido – líquido



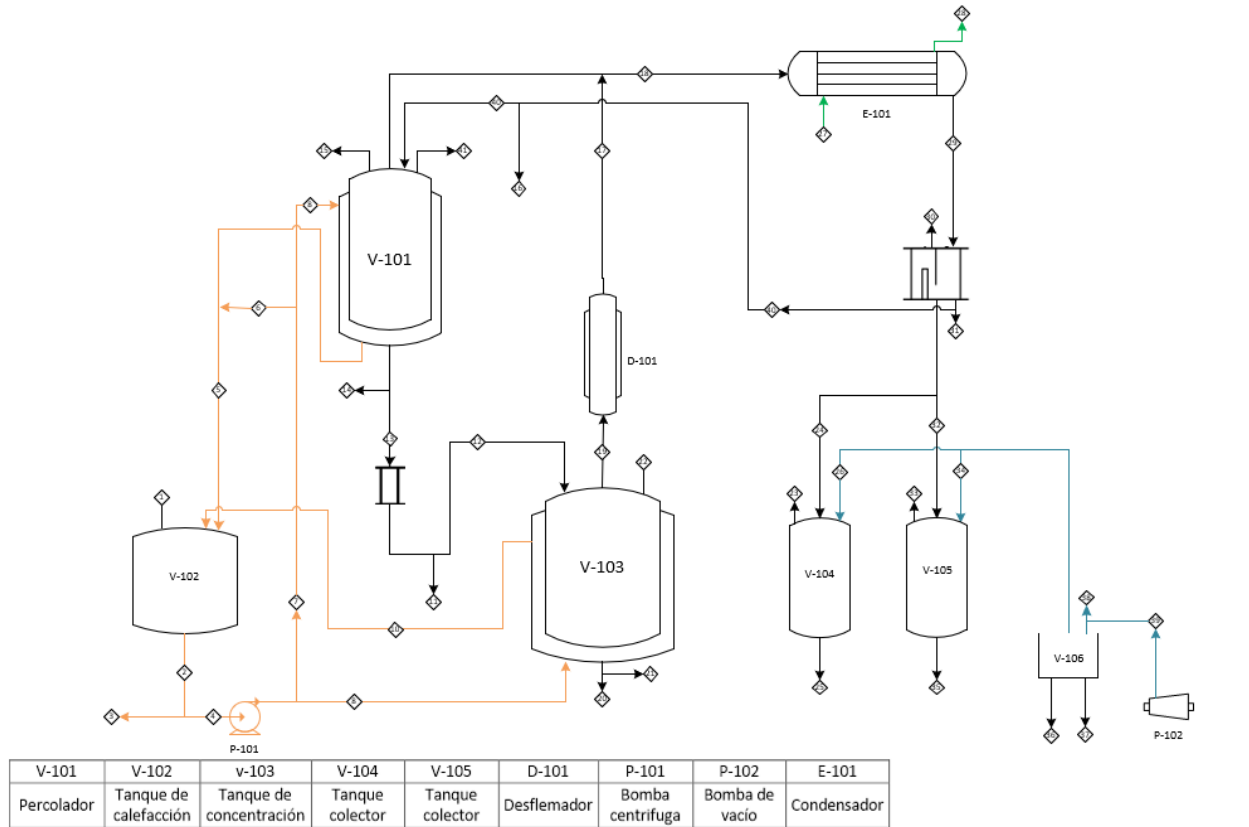
**Nota.** En la figura se muestra el diagrama BFD del proceso de Extracción sólido - líquido.

- **Descripción del BFD operación de Extracción sólido - líquido**

El proceso consiste en adecuar el aceite térmico a la temperatura que se quiere operar, se carga el sólido en la operación de percolación, luego se añade el solvente al sistema, en la etapa de concentración obtenemos nuestra sustancia de interés, en donde se evapora el solvente, luego en la condensación del solvente y por último lo recolectamos

**Figura 21.**

Diagrama PFD del proceso de Extracción sólido - líquido



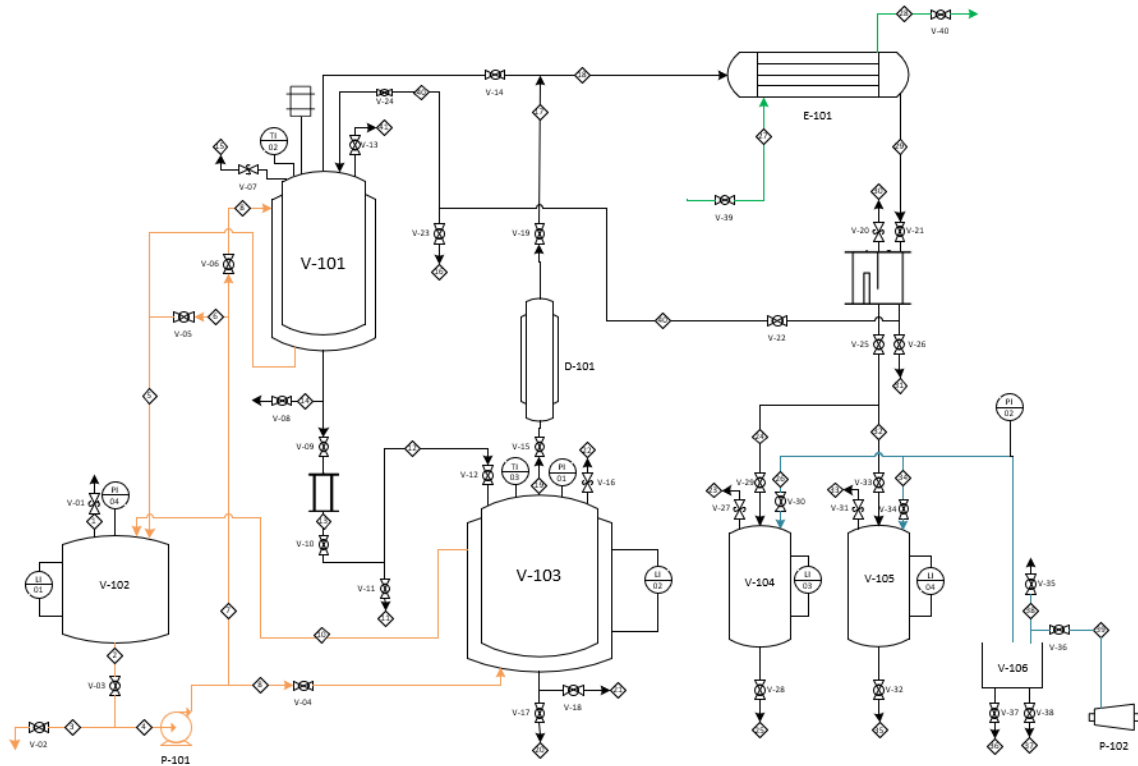
**Nota.** En la figura se muestra el diagrama PFD del proceso de Extracción sólido - líquido.

• **Descripción del PFD operación de Extracción sólido - líquido**

El proceso empieza en el percolador (V-101), en donde se adiciona el sólido problema y el solvente. El percolador es calentado con aceite térmico que se suministra a través del tanque de calefacción (V-102 ) por una bomba (P-101), después el solvente sale hacia el tanque de concentración (V-103) que recolecta el solvente y la sustancia de interés. Es calentado con aceite térmico proveniente del tanque calefactor (V-102), para recuperar el solvente y concentrar la sustancia de interés. El solvente pasa por un desflemador que evita la generación de espuma, pasa al condensador (E-101) para condensarlo, luego es depositado en los tanques colectores (V-104 y V-105). La colección se puede hacer por operación al vacío a través de la bomba (P-102) para eliminar agentes contaminantes en el solvente recuperado, estos agentes externos se acumulan en la trampa de vacío (V-106).

**Figura 22.**

*Diagrama P&D del proceso de Extracción solido - liquido*



**Nota.** En la figura se muestra el diagrama P&D del proceso de Extracción solido - liquido.

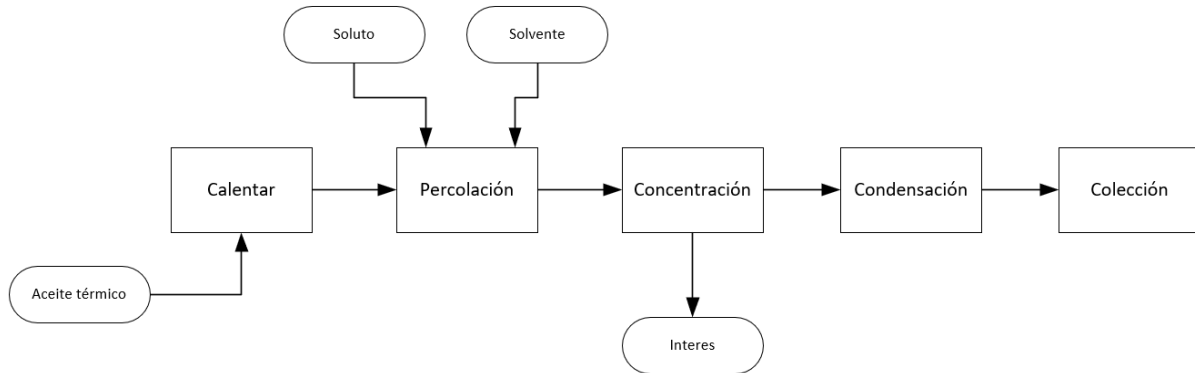
- **Descripción del P&D operación de Extracción solido - liquido**

El sistema de percolación cuenta con una termocupla (TI-02) para controlar la temperatura del en el percolador (V-101). El sistema de calefacción del aceite térmico es controlado por una termocupla (TI-01) y un indicador de temperatura (LI-01). La colección cuenta con una termocupla (TI-03), un manovacuómetro(PI-01) y un indicador de nivel (LI-02), para el control de temperatura, presión y nivel en el tanque concentrador (V-103). El condensador (E-101) cuenta con una termocupla (TI-04) a la entrada y otra termocupla (TI-05) a la salida del equipo. Los tanques colectores (V-104 y V-105) tienen un indicador de nivel cada uno (LI-03 y LI-04). La operación al vacío cuenta con un manovacuómetro(PI-02) en la conexión de la trampa de vacío con los tanques colectores (V-104 y V-105).

### 2.2.2. Diagramas extracción líquido-líquido

Figura 23.

Diagrama de BFD del proceso de Extracción líquido - líquido



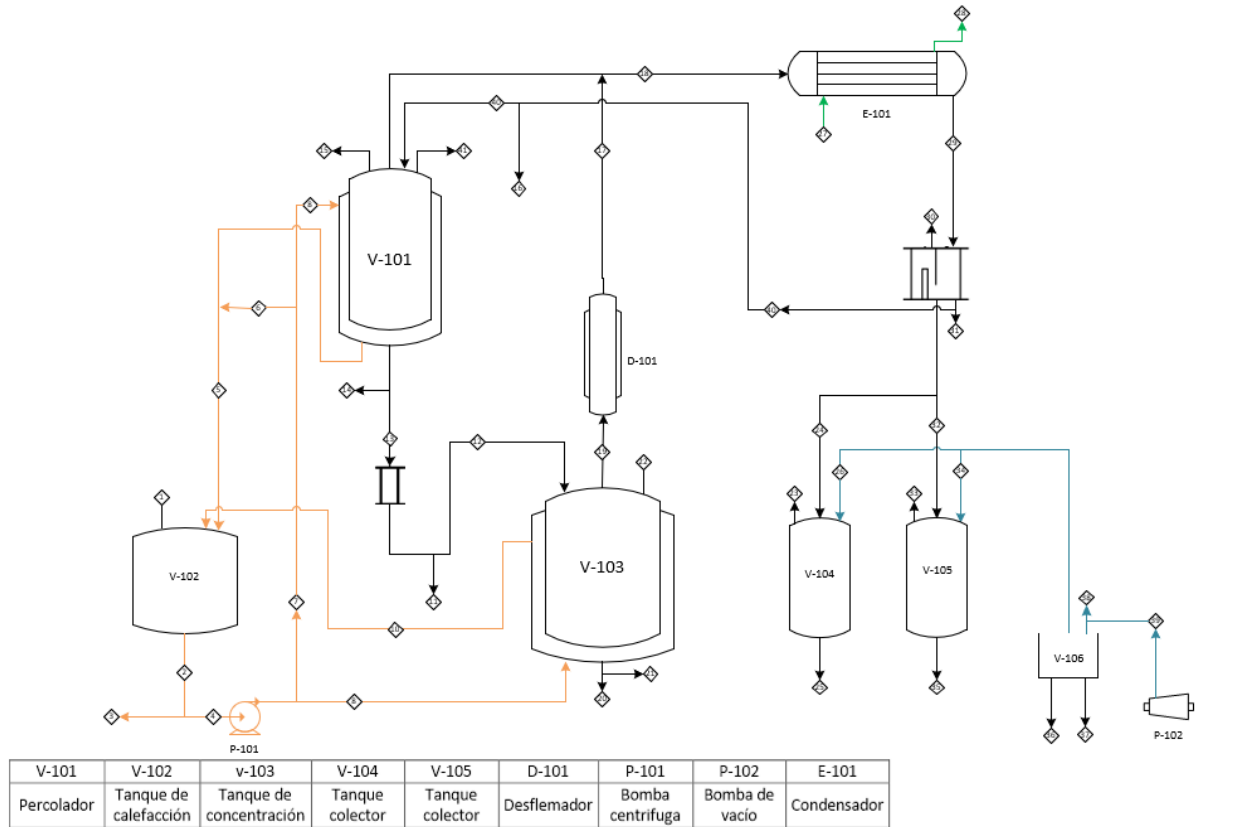
**Nota.** En la figura se muestra el diagrama BFD del proceso de Extracción líquido – líquido.

- **Descripción del BFD operación de Extracción líquido - líquido**

El proceso consiste en adecuar el aceite térmico a la temperatura que se quiere operar, se carga el líquido problema en la operación de percolación, luego se añade el solvente al sistema, en la etapa de concentración obtenemos nuestra sustancia de interés, en donde se evapora el solvente, luego en la condensación del solvente y por último lo recolectamos.

**Figura 24.**

Diagrama PFD del proceso de Extracción líquido - líquido



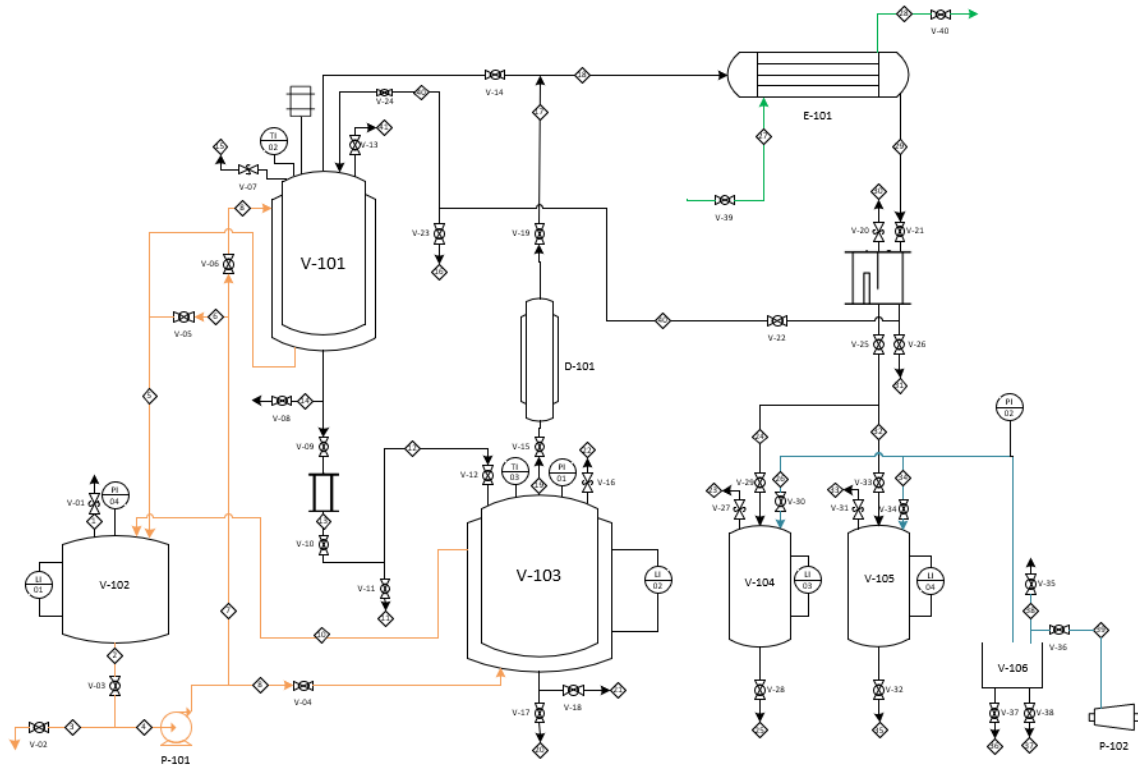
**Nota.** En la figura se muestra el diagrama PFD del proceso de Extracción líquido - líquido.

- **Descripción del PFD operación de Extracción líquido - líquido**

El proceso empieza en el percolador (V-101), en donde se adiciona el líquido problema y el solvente. El percolador es calentado con aceite térmico que se suministra a través del tanque de calefacción (V-102 ) por una bomba (P-101), después el solvente sale hacia el tanque de concentración (V-103) que recolecta el solvente y la sustancia de interés. Es calentado con aceite térmico proveniente del tanque calefactor (V-102), para recuperar el solvente y concentrar la sustancia de interés. El solvente pasa por un desflemador que evita la generación de espuma, pasa al condensador (E-101) para condensarlo, luego es depositado en los tanques colectores (V-104 y V-105). La colección se puede hacer por operación al vacío a través de la bomba (P-102) para eliminar agentes contaminantes en el solvente recuperado, estos agentes externos se acumulan en la trampa de vacío (V-106).

**Figura 25.**

*Diagrama P&D del proceso de Extracción líquido – líquido*



**Nota.** En la figura se muestra el diagrama P&D del proceso de Extracción líquido - líquido.

- **Descripción del P&D operación de Extracción líquido - líquido**

El sistema de percolación cuenta con una termocupla (TI-02) para controlar la temperatura del en el percolador (V-101). El sistema de calefacción del aceite térmico es controlado por una termocupla (TI-01) y un indicador de temperatura (LI-01). La colección cuenta con una termocupla (TI-03), un manovacuómetro(PI-01) y un indicador de nivel (LI-02), para el control de temperatura, presión y nivel en el tanque concentrador (V-103). El condensador (E-101) cuenta con una termocupla (TI-04) a la entrada y otra termocupla (TI-05) a la salida del equipo. Los tanques colectores (V-104 y V-105) tienen un indicador de nivel cada uno (LI-03 y LI-04). La operación al vacío cuenta con un manovacuómetro(PI-02) en la conexión de la trampa de vacío con los tanques colectores (V-104 y V-105).

### 2.2.3. Tabla de parámetros y variables extracción sólido-líquido y líquido-líquido

Tabla 5.

Tabla de parámetros y variables extracción sólido-líquido y líquido-líquido

Equipo	Código	Parámetros	Descripción	Variables	Descripción	Rangos de operación
<b>Tanque de fluido calefactor</b>	V-102	Volumen	Espacio destinado para el almacenamiento del fluido	_____	_____	Capacidad de 50 L
		_____	_____	Temperatura	Control de la energía liberada en el proceso	-10°C a 130°C
<b>Bomba centrífuga</b>	P-101			Caudal	Control de la cantidad de fluido que circula en el proceso por unidad de tiempo	Caudal de 19 L/min, altura manométrica de 16 m, potencia de 0,5 hp y tensión de 110V-120V
<b>Tanque percolador agitado</b>	V-103	Volumen	Espacio destinado para el almacenamiento del fluido	Caudal	Control de la cantidad de fluido que circula en el proceso por unidad de tiempo	Capacidad de 20L, geometría cónica
<b>Moto-reductor</b>	V-103	_____	_____	Velocidad de fluido	Regulación de la rapidez del flujo de fluido	Potencia de 0,34 hp, torque de 18 Nm, conexión 220V/240V, relación de reducción 15:1 y 115 rpm
<b>Condensador</b>	E-101	Geometría	Disposición del diseño para el flujo de los fluidos	_____	_____	Arreglo de tubos y coraza según TEMA
<b>Visor de condensación</b>	----- ---	Volumen	Espacio destinado para el	_____	_____	Capacidad de 1L

			almacenamiento del fluido			
<b>Tanque concentrador</b>	V-103	Volumen	Espacio destinado para el almacenamiento del fluido	_____	_____	Capacidad de 20L
<b>Tanques colectores de solvente</b>	V-104 V-105	Volumen	Espacio destinado para el almacenamiento del fluido	_____	_____	Capacidad de 10L
<b>Trampa de vacío</b>	V-106	Volumen	Espacio destinado para el almacenamiento del fluido	_____	_____	_____
<b>Bomba de diafragma</b>	P-102	_____	_____	Presión	Descarga de fuerza	Remoción de hasta 70.3 L/min, Presión mínima de 0,15 bar, Potencia de 0,2 hp, 220V ,60 Hz.

**Nota.** La tabla representa los parámetros y las variables por equipo en la planta de absorción.

En esta tabla encontramos los parámetros y variables por equipo en la planta de extracción, así como la descripción y los rangos de operación. Las líneas en la tabla indican la información que no se tiene en el momento del equipo. Por lo que se recomienda una caracterización de estas características.

#### **2.2.4. Caracterización del equipo recomendada**

Se debe realizar una caracterización más completas de los equipos que componen la unidad de extracción porque la información suministrada carece de información para definirlos rangos de operación y las especificaciones técnicas.



### 2.3. Planta de absorción de gases

**Figura 26.**

*Columna de absorción del Centro de purificación y refinación (CEPURE).*



**Nota.** La figura representa una fotografía de la columna de absorción del Centro de purificación y refinación (CEPURE). Tomado de [“PRODUCTOS Y SERVICIOS |PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT.” <https://andreaorjuela.wixsite.com/website/productos-y-servicios> (accessed Jun. 06, 2022)]

La unidad PAG-M está compuesta por el sistema de generación de aire, el de humidificación, la columna de absorción, los tanques de acumulación del solvente, y el tablero de control (ver esquema). El equipo es robusto, durable, construido en acero inoxidable 304 con acabado brillante. Puede ser utilizado para una gran diversidad de aplicaciones de absorción de gases entre otras: absorción de CO<sub>2</sub> con solución alcalina o con aminas, compuestos orgánicos volátiles con aceite lubricante, aire contaminado con gases ácidos o alcalinos con agua, absorción con líquidos iónicos, etc. Puede ser utilizado para docencia, investigación, y extensión.

- **Sistema de generación de aire.**

Compresor o Cilindro de gas sintético seco.

Compresor de aire a una presión mínima de 2 bar, y un flujo de 20 L/min. El compresor cuenta con purga periódica del tanque acumulador, filtro de aire para remover partículas sólidas y aceites lubricantes, y línea de desagüe para remover las purgas de agua. Cuenta con manómetro y regulador de flujo a la entrada de la línea de aire.

- **Sistema de humidificación.**

La columna humidificadora está construida con una sección de 3" de diámetro y una altura de 60 cm en acero inoxidable. Cuenta con cabezales flanchados con acoples rápidos, y un sistema de atomización de agua para garantizar saturación completa. Cuenta con conexiones de entrada y salida de gas y líquido en tubería de 1/4" de acero inoxidable y válvulas de bola. A la salida de gas de la columna humidificadora se encuentra un ciclón para evitar gotas de arrastre y/o entradas de gotas de agua a la columna de absorción.

- **Columna de absorción.**

La columna está construida con dos secciones principales de 3" de diámetro y cuenta con cabezal superior e inferior. La altura total del sistema es de 2 m, y las secciones están acopladas con unión tipo "clamp" para montaje y desmontaje rápido. Cada sección se encuentra llena de empaque al azar, tipo Propak, de material inerte con dimensión característica de 1/4". La columna cuenta con 6 toma muestras para la fase líquida y visor de vidrio en el cuerpo principal. Igualmente tiene 4 sensores tipo J para determinar el perfil de temperaturas, y dos sensores de presión para medir la caída de presión en operación. Dichos sensores están conectados por cables al tablero de control. Entre las 2 secciones principales se encuentran el soporte del empaque, así como el re-distribuidor de líquido para evitar su canalización en las paredes. La sección inferior de la columna cuenta con una entrada para vapor de 1" y una salida por la parte inferior en tubería de 1/4" con válvulas en acero inoxidable para descarga y purga de la columna. La sección superior de la columna tiene una salida en tubería de 1" para venteo del aire seco. Igualmente incluye un acople de 1/4" para la entrada del solvente, con válvula de acero inoxidable.

- **Medidores y controladores.**

El sistema permite regulación manual de los flujos de gas y de solvente, por medio del uso de válvulas de aguja o globo, y rotámetros previamente calibrados. Las temperaturas en diferentes puntos del proceso se miden con termocuplas tipo J. Los sensores de presión son de alta precisión y operan de 0 a 4 bar. Se cuenta con sensores de humedad relativa en la línea de alimentación y descarga del aire. La información de los sensores se lleva a “displays” localizados en el tablero de control.

El seguimiento de la operación se puede realizar a las dos corrientes del proceso. Inicialmente se puede hacer medición del cambio de la humedad del gas entre la entrada y la salida del equipo. Igualmente se puede hacer seguimiento por análisis de las muestras tomadas a lo largo de la columna y su concentración se establece por análisis rápido usando refractómetro (previa calibración).

- **Sistema de almacenamiento de solvente fresco.**

Tanque cilíndrico de acero inoxidable, con capacidad de almacenar 50 L de solvente. El tanque cuenta con conexión a bomba centrífuga para recirculación y alimentación a la columna de absorción. El tanque de solvente fresco tiene tapa removible para llenado, válvula de retorno tipo bola de 1/2” en inoxidable, purga inferior en línea de 1/2” con válvula de bola en inoxidable, y línea de descarga en el mismo tipo de válvula hacia el sistema de bombeo para alimentar la columna. Ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable.

- **Sistema de almacenamiento de solvente gastado.**

Tanque cilíndrico en acero inoxidable de 50 L con chaqueta de calentamiento para almacenamiento de solvente gastado y regeneración del solvente. El tanque de acumulación de solvente gastado cuenta con un arreglo de válvulas de nivel visible externo en 1/2”, purga inferior en línea de 1/2” con válvula de bola en inoxidable, y una tapa flanchada removible con empaque y tornillos en acero inoxidable. Sobre la tapa están montados: una válvula de bola de 1/4” en acero inoxidable para alivio atmosférico, una línea de entrada con válvula de bola de 1/2”, un acople a línea de vacío con válvula de bola de acero inoxidable de 1/2” y una conexión para termocupla. El tanque se encuentra aislado en fibra de vidrio. Ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable.

- **Sistema de vacío.**

Bomba de diafragma con capacidad para remover 13 L/min y una presión mínima de 0.1 bar con ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable. Aguas arriba de la bomba de vacío se encuentra una trampa de vacío para remoción de gases condensables y protección de la bomba de vacío. La trampa de vacío es un tanque cilíndrico en acero inoxidable con serpentín interno de 1/2". El tanque se carga con hielo y agua, que actúa como medio de enfriamiento para los gases condensables. La espiral y el tanque cuentan con purga inferior en línea de 1/2" con válvula de bola. Ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable.

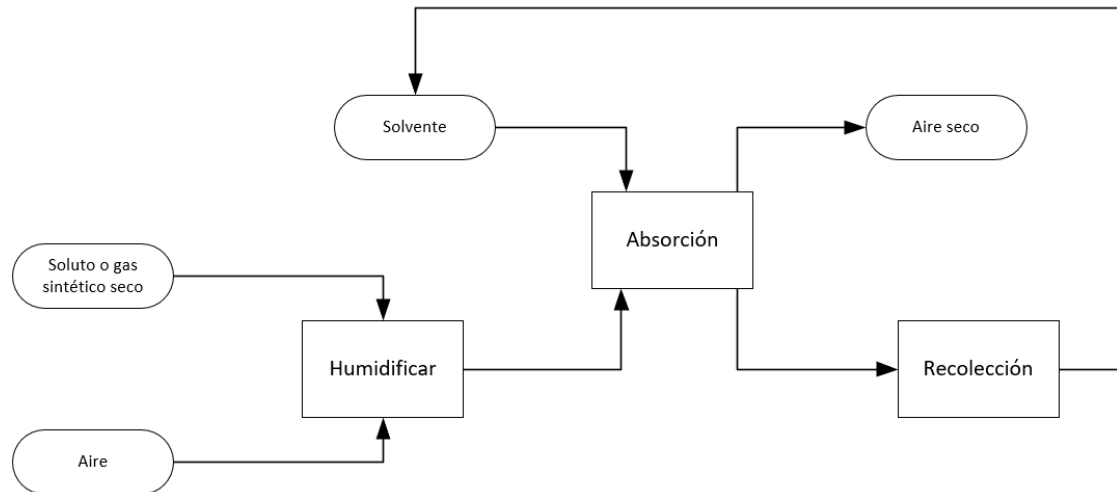
- **Tablero de control.**

Unidad de manejo remoto de los indicadores de temperatura, las bombas de solvente y agua, los indicadores de presión y los higrómetros. Cuenta con indicadores de temperaturas, un selector de termopares, 4 botones (energización del sistema, encendido de sistema de termopares, encendido bomba de solvente fresco, encendido bomba de recirculación de solvente gastado), 4 bombillos testigo (encendido de las 2 bombas, corriente de la caja eléctrica, corriente de sensores) y una parada de emergencia [23].

### 2.3.1. Diagrama de BFD del proceso de absorción

Figura 27.

Descripción del BFD operación de absorción



**Nota.** En la figura se muestra el diagrama BFD del proceso de absorción.

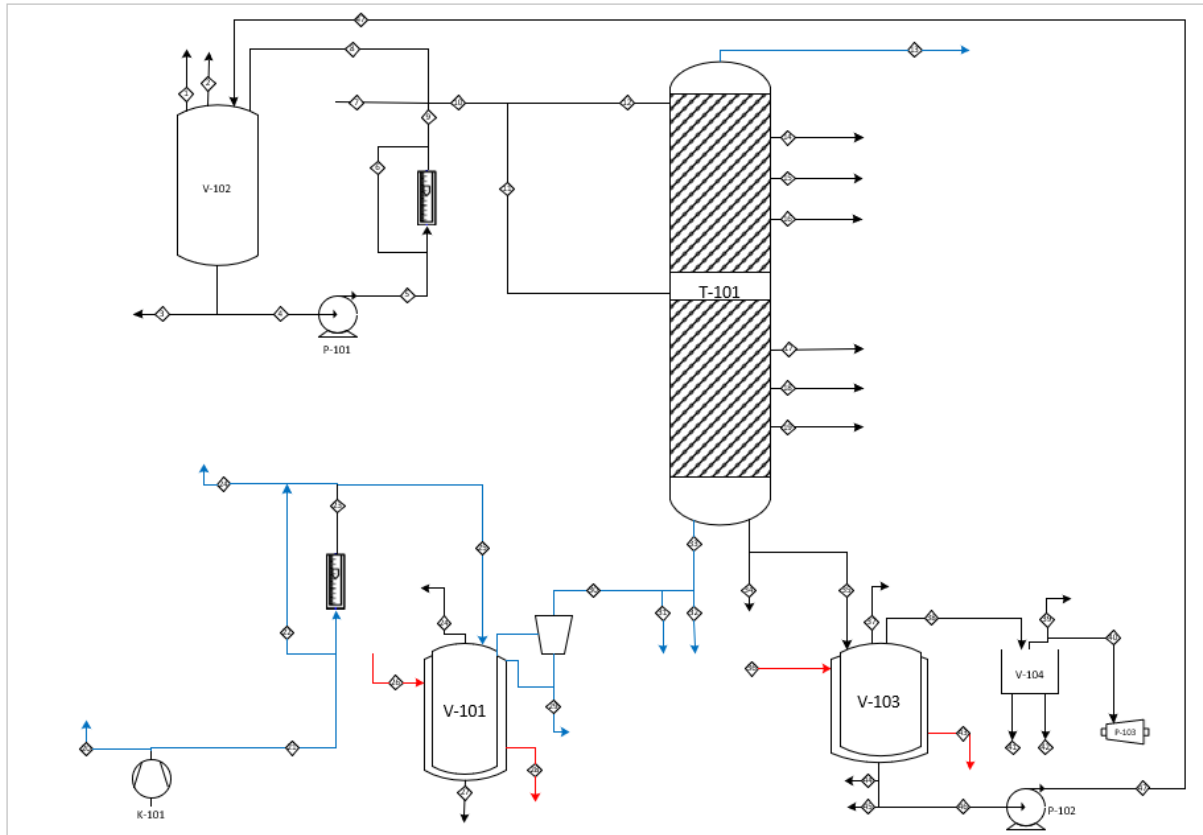
- **Descripción del BFD operación de absorción**

El proceso de humidificación, acondiciona el flujo de aire con el reactivo de interés, para obtener el flujo experimental. El proceso de absorción recibe en la cima el solvente y en el fondo el flujo experimental. Al ocurrir la absorción del reactivo de interés por el solvente, este sale por el fondo, el aire seco, libre del reactivo de interés sale por la cima. En el sistema de recolección de solvente, se separa el solvente del reactivo experimental por temperatura de ebullición. El reactivo de interés es succionado por efecto al vacío, mientras que el solvente se recircula a la alimentación de solvente.

### 2.3.2. Diagrama PFD del proceso de absorción

Figura 28.

Descripción del BFD operación de absorción



Nota. En la figura se muestra el diagrama PFD del proceso de absorción.

- **Descripción del PFD operación de absorción**

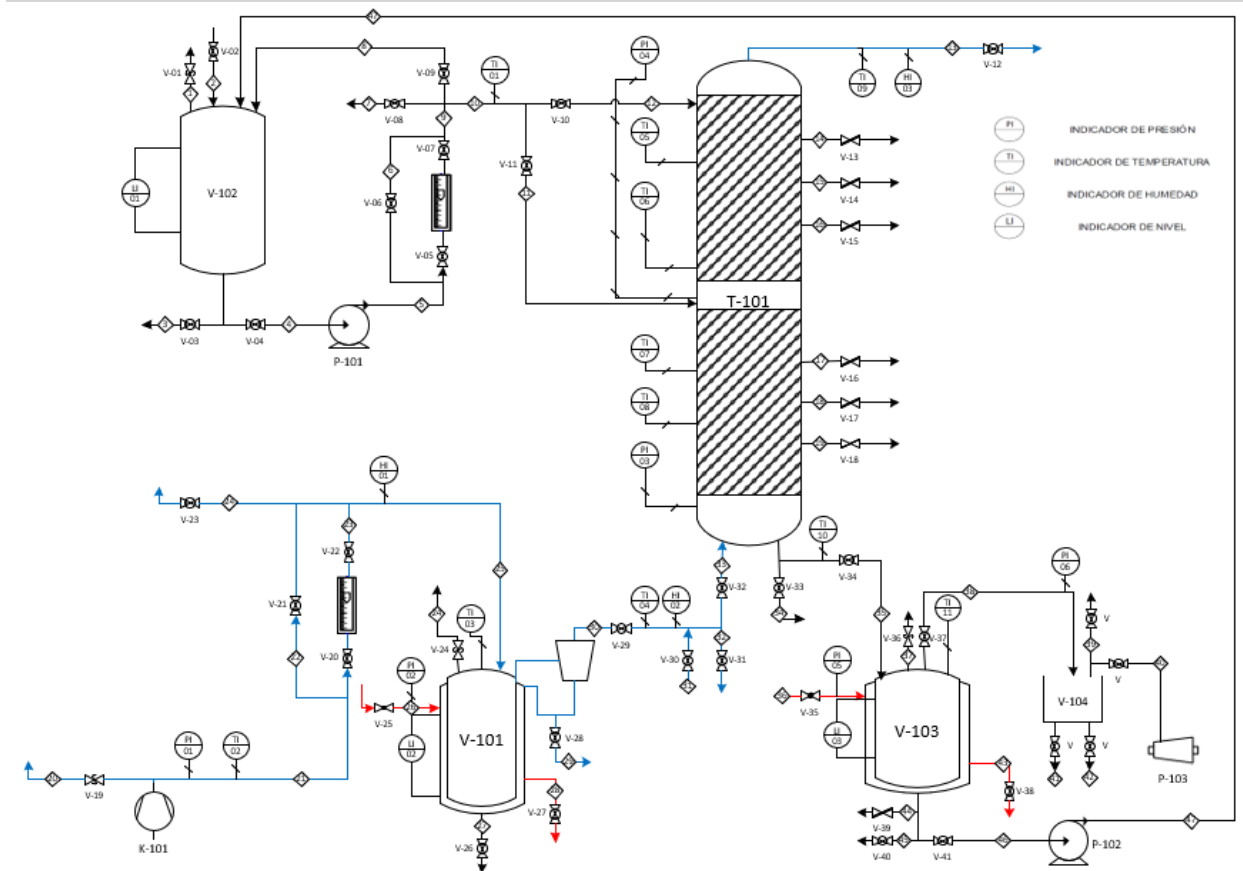
El proceso comienza con la humidificación del aire con el reactivo experimental, el flujo pasa por el compresor K-101 para llegar al tanque humidificador V-101, en donde se adiciona el reactivo experimental, este tanque se conecta al fondo de la torre de absorción T-101. La alimentación del solvente se da desde el tanque de solvente V-102, la bomba de solvente P-101, se encarga de alimentar el solvente a la torre de absorción T-101. El proceso de absorción en la torre T-101, tiene una salida para el aire seco y una salida para el tanque colector de solvente gastado V-103 que contiene el reactivo experimental. Con el sistema de vacío se recupera el reactivo de interés que se recupera en la trampa de vacío V-104, con una succión de la bomba de vacío P-103. El tanque colector V-103 con un proceso de calentamiento envía separa el solvente del reactivo de interés, posterior a este el solvente en el fondo del tanque se recircula a través de una bomba P-102 al

tanque de alimentación de solvente V-102.

### 2.3.3. Diagrama P&D del proceso de absorción

Figura 29.

Descripción del BFD operación de absorción



Nota. En la figura se muestra el diagrama P&D del proceso de absorción.

#### Descripción del P&D operación de absorción

El sistema de humidificación cuenta con un indicador de presión (PI-01), una termocupla (TI-02), un rotámetro y un indicador de humedad (HI-01) a la salida del compresor (K-101), el tanque humidificador (V-101) tiene una termocupla (TI-03), un indicador de presión (PI-02) y un indicador de nivel (LI-02), a la salida del equipo encontramos una termocupla (TI-04) y un indicador de humedad (HI-02). El tanque de alimentación (V-102) tiene un indicador de nivel (LI-01); a la salida de la bomba del solvente encontramos un rotámetro y una termocupla (TI-01). La torre de absorción (T-101) cuenta con dos indicadores de presión, uno en la cima (PI-04) y el otro en el fondo (PI-04); 4 termocuplas (TI-05, TI-06, TI-07 y TI-08) ubicadas a diferentes alturas en

la torre, a la salida del aire de la torre encontramos una termocupla (TI-09) y un indicador de humedad (HI-03). El tanque recolector (V-103) tiene una termocupla (TI-10) en la entrada que viene desde la torre de absorción (T-101), cuenta con una termocupla (TI-11), un indicador de presión (PI-05) y un indicador de nivel (LI-03). La operación al vacío cuenta con un indicador de presión (PI-06) en la conexión de la trampa de vacío (V-104) con los tanques recolector (V-103).

### 2.3.4. Tabla de parámetros y variables planta de absorción de gases

**Tabla 6.**

*Tabla de parámetros y variables planta de absorción de gases*

Equipo	Código	Parámetros	Descripción	Variables	Descripción	Rangos de operación
<b>Compresor</b>	K-101	Flujo de aire	Circulación del aire en unidad de tiempo	Presión	Fuerza impulsora	Presión de 2 bar y flujo de aire de 20 L/min
<b>Tanque de acumulación</b>	V-101	Flujo de gas	Almacenamiento periódico del fluido	Caudal	Control de la cantidad de fluido que circula en el proceso por unidad de tiempo	—
<b>Línea de desagüe</b>	-----	-----	-----	Presión	Fuerza impulsora	Tubería en gres o PVC 1" mínimo
<b>Columna humidificadora</b>	V-101	Flujo de agua	Control de la atomización para la correcta saturación	-----	-----	Temperatura ambiente, flujo de 30 L/min, altura de 60 cm, sección de 3" de diámetro
<b>Columna de absorción</b>	T-101	Altura del empaque	Condición de diseño para las partículas sólidas en las cuales circulara el fluido	Presión	Descarga de fuerza	Altura total de 2m, empacada al azar
		-----	-----	Velocidad de flujo	Regulación de la rapidez del	-----



					flujo de fluido	
		_____	_____	Temperatura	Control de la energía liberada en el proceso	_____
<b>Sensores de presión</b>	PI	_____	_____	Presión	Fuerza impulsora	0-4 bar
<b>Tanque de almacenamiento de solvente fresco</b>	V-102	Volumen	Espacio destinado para el almacenamiento del fluido	_____	_____	Almacena hasta 50 L de solvente, geometría cilíndrica
<b>Bomba centrífuga</b>	P-101	Flujo de agua	Control de la cantidad de fluido por unidad de tiempo	Caudal	Control de la cantidad de fluido que circula en el proceso por unidad de tiempo	_____
<b>Tanque de almacenamiento de solvente gastado</b>	V-103	Volumen	Espacio destinado para el almacenamiento del fluido	_____	_____	Almacena hasta 50 L de solvente, geometría cilíndrica
<b>Bomba de diafragma</b>	P-103	_____	_____	Presión	Descarga de fuerza	Remoción de 13 L/min, presión de 0,1 bar

**Nota.** La tabla representa los parámetros y las variables por equipo en la planta de absorción.

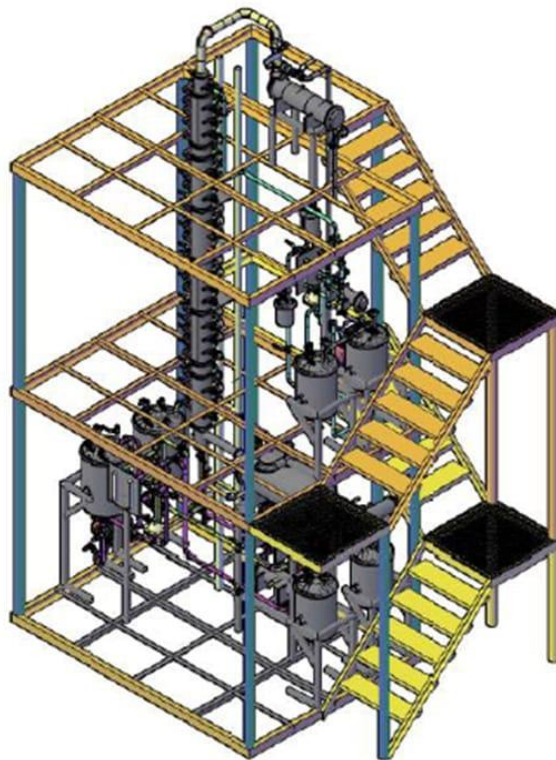
En esta tabla encontramos los parámetros y variables por equipo en el planta de absorción, así como la descripción y los rangos de operación. Las líneas en la tabla indican la información que no se tiene en el momento del equipo. Por lo que se recomienda una caracterización de estas características.

### **2.3.5. Caracterización del equipo**

La unidad de absorción carece de información, para las bombas que se conectan a los tanques, el desflemador, la columna de absorción, el empaqué que utiliza la columna. Debido a esto hay valores en los rangos de operación y especificaciones que no se pueden definir.

## 2.4. Planta de destilación continua

**Figura 30.** Columna de destilación del Centro de purificación y refinación (CEPURE)



**Nota.** La figura representa una fotografía de la columna de destilación del Centro de purificación y refinación (CEPURE). Tomado [“PRODUCTOS Y SERVICIOS |PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT.” <https://andreaorjuela.wixsite.com/website/productos-y-servicios> (accessed Jun. 06, 2022)]

La unidad PDC3-M está compuesta por: el sistema de alimentación, la columna de destilación, el sistema de condensación y reflujo, los tanques de acumulación de destilado, medidores, y el tablero de control (ver esquema). El equipo es robusto, durable, construido en acero inoxidable 304 con acabado brillante. Puede ser utilizado para destilación de una gran diversidad de mezclas ideales y no-ideales, en aplicación de destilación tradicional, extractiva, y azeotrópica. Igualmente se puede operar en forma de destilación simple, destilación batch con rectificación y destilación continua. Puede ser utilizado para docencia, investigación, y extensión.

- **Sistema de alimentación**

Consta de dos tanques cilíndricos de acero inoxidable, con capacidad para almacenar 50 L, con su respectiva bomba dosificadora de carga. Uno de los tanques corresponde a la mezcla problema y el otro se utiliza para el solvente. El tanque cuenta con un arreglo de válvulas de nivel visible externo, purga inferior con válvula, y una tapa flanchada removible con empaque y tornillos en acero inoxidable. El tanque cuenta con válvula para alivio atmosférico, una línea de entrada, un acople a línea de vacío, una conexión para termocupla, y una entrada para llenado. Ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable. El flujo de alimentación se conduce por bomba a través de un intercambiador de calor de tubos y coraza construido en acero inox. 304. El intercambiador cuenta con sensores de temperatura a la entrada y salida del flujo de proceso.

- **Columna de destilación y rehervidor**

La columna está construida con 3 secciones principales de 1m de altura y 4" de diámetro, con posibilidad de alimentación en cada una, y dos cabezales (uno superior y otro inferior). La altura total del sistema, incluyendo soportes, tanques, estructura y condensador es de 6 m aproximadamente. Las secciones están acopladas con flanche, empaques y tornillos y cuentan con aislamiento térmico. Cada sección está llena de empaque al azar de alta eficiencia en acero inoxidable. Igualmente, cada sección cuenta con 3 tomas muestras para la fase líquida, 3 sensores de temperatura, y un visor de vidrio. La columna cuenta con un sensor de presión en los fondos. Dichos sensores están conectados por cables al tablero de control.

La sección inferior de la columna cuenta con una entrada de vapor, y una salida por la parte inferior con válvula para descarga y purga de la columna. La sección superior de la columna cuenta con una salida de vapor, y una entrada de retorno de reflujo con válvula de acero inoxidable.

El rehervidor es un contenedor de acero inoxidable con área de intercambio de calor sumergida y aislamiento térmico. El rehervidor cuenta con un arreglo de válvulas de nivel visible externo, purga inferior con válvula, acoples con válvula para para alivio atmosférico, dos conexiones de entrada para retorno de la columna y alimentación, acoples para termocupla, sensor de presión, y una conexión para operación en destilación simple. Ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable. El producto de fondos se envía a través de un enfriador y se almacena en un tanque colector. Este tanque cuenta con conexión para alivio atmosférico, una línea de entrada con

válvula, un acople a línea de vacío con válvula, y una conexión para termocupla. Ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable.

- **Sistema de condensación y reflujo**

Consta de un intercambiador de coraza y tubos que hace las veces de condensador, un visor de condensación, un tanque de acumulación de reflujo con su respectiva bomba, y dos tanques cilíndricos simétricos a modo de colectores.

El visor de condensación es un tanque con un arreglo de válvulas para entrada de condensado, conexión atmosférica, salida a tanque de reflujo, salida para destilados, y posibilidad de hacer separación de fases líquidas.

El tanque de reflujo cuenta con conexiones de entrada, de alivio y de descarga con válvula. El tanque esta acoplado a una bomba para enviar el reflujo al tope de la columna. El destilado se envía a un enfriador y se almacena en dos tanques colectores de igual capacidad. Cada tanque cuenta con conexión para alivio atmosférico, una línea de entrada con válvula, un acople a línea de vacío con válvula, y una conexión para termocupla. Ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable.

- **Medidores y controladores**

El sistema cuenta con regulación manual de los flujos de alimentación, de reflujo y de vapor (en el caso de contar con vapor de caldera) por medio del uso de válvulas de aguja o globo, y rotámetros para líquidos previamente calibrados. Las temperaturas en diferentes puntos del proceso se miden con termocuplas tipo J o K. Los sensores de presión son transductores de alta precisión. La información de los sensores se lleva a un PLC localizado en el tablero de control y la información se presenta en pantalla. El sistema puede contar con calentamiento eléctrico o por vapor de servicio.

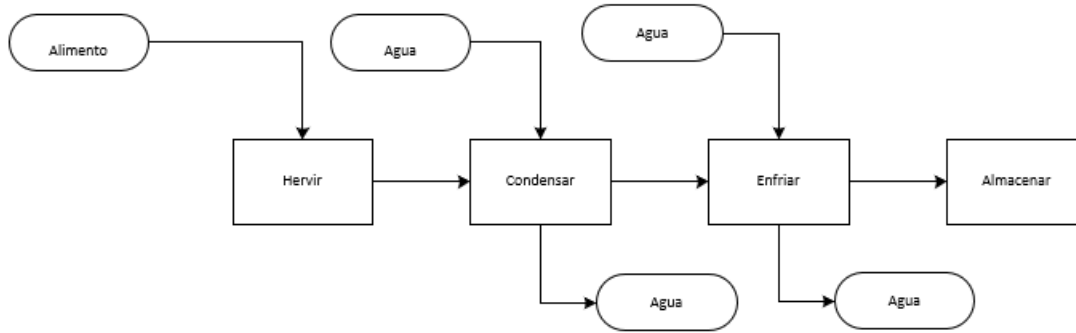
- **Tablero de control**

Unidad de manejo, encendido de los indicadores de temperatura, las bombas de alimentación de reactivos, la bomba de reflujo. Cuenta con interruptor principal y parada de emergencia. El tablero se entrega en acero inoxidable 304 de fácil acceso para su mantenimiento. La visualización de las temperaturas se hará en una pantalla táctil a color de 7", y la señal se manejará con un PLC Siemens S7 1200 y módulos de entradas analógicas [24].

### 2.4.1. Operación destilación simple

Figura 31.

Diagrama de BFD del proceso de destilación simple



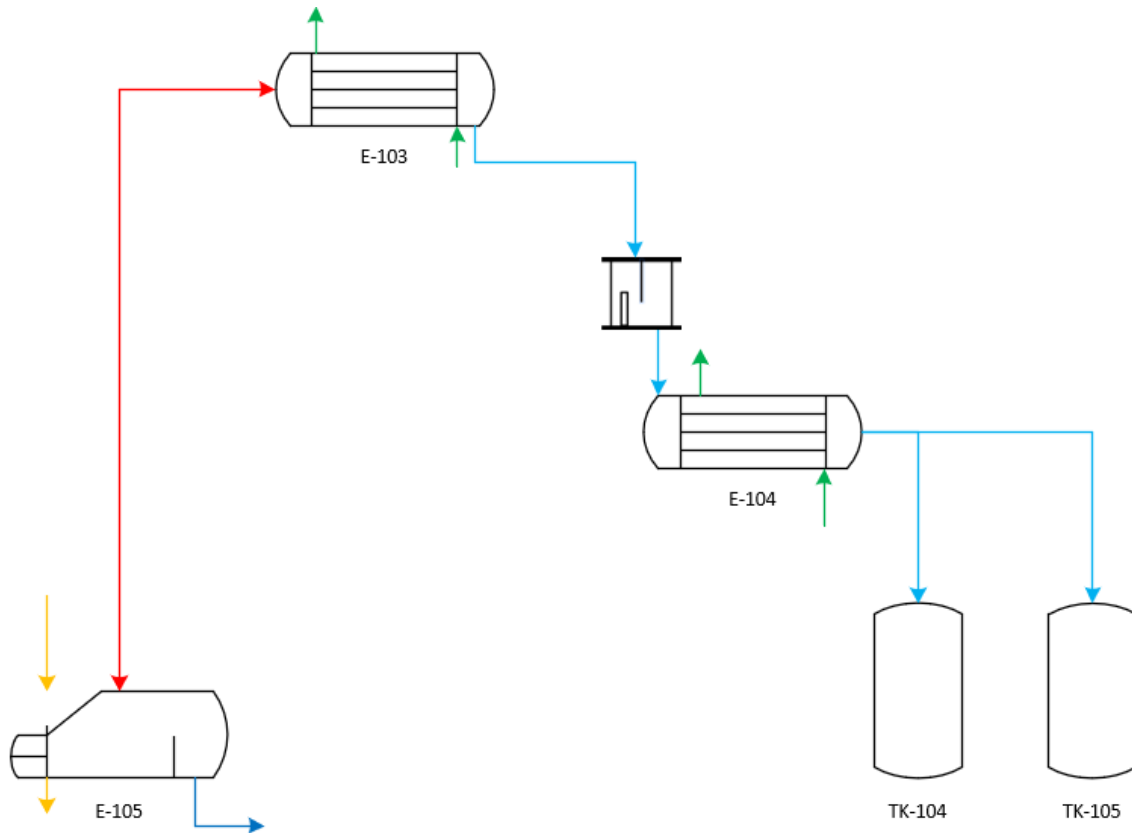
Nota. En la figura se muestra el diagrama BFD del proceso de destilación simple.

- **Descripción del BFD operación de destilación simple**

El alimento experimental se calienta en el rehervidor y se separa por punto de ebullición, el producto más liviano, se condensa, después se adecua la temperatura, para su posterior almacenaje.

**Figura 32.**

*Diagrama PFD del proceso de destilación simple*



**Nota.** En la figura se muestra el diagrama PFD del proceso de destilación simple.

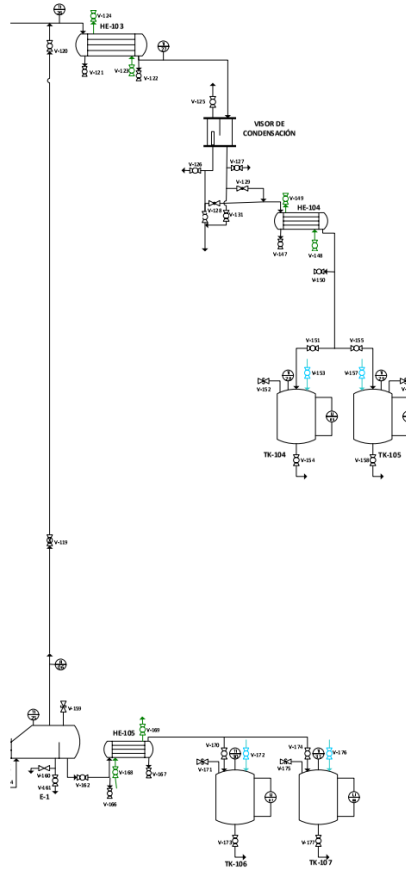
- **Descripción del PFD operación de destilación simple**

El rehervidor E-105 recibe contiene la mezcla problema, a partir del cambio de fase por punto de ebullición, el producto liviano se envía al condensador E-103, en donde cambia de fase, pasa un intercambiador de calor para controlar la temperatura del producto liviano. Que se almacena en los tanques colectores TK-104 y TK-105.

**Figura 33.**

*Diagrama P&D del proceso de destilación simple*

Diagrama P&D proceso de destilación SIMPLE



Nota. En la figura se muestra el diagrama PFD del proceso de destilación simple.

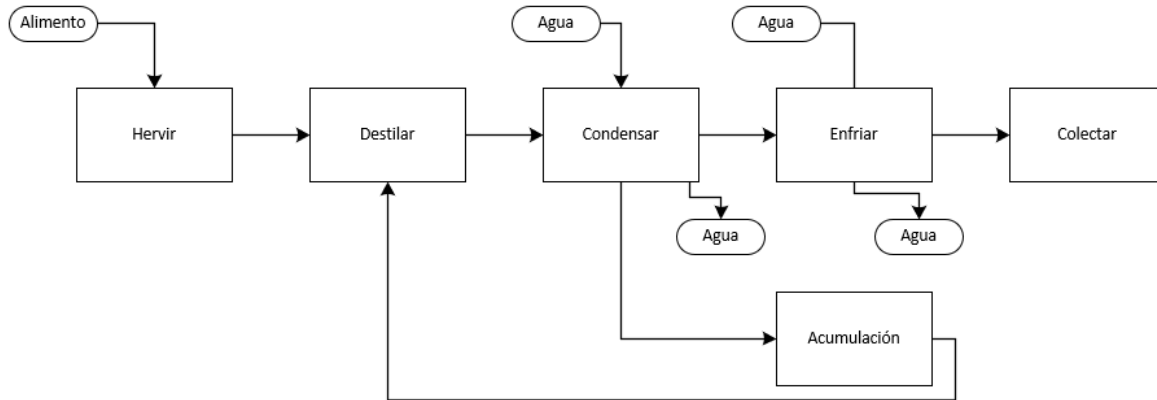
- **Descripción del P&D del proceso de destilación simple**

El rehervidor E-105 cuenta con un indicador de presión PI-07 en la entrada del flujo de servicio, un indicador de presión PI-06 a la conexión con la columna de destilación, en el tanque colector TK-106, encontramos una termocupla TI-30 y un indicador de nivel LI-07, en el tanque colector TK-107, encontramos una termocupla TI-31 y un indicador de nivel LI-08. El condensador E-103 cuenta con una termocupla TI-26 en la entrada desde la columna y una termocupla TI-27 a la salida del flujo condensado, cuenta con visor de condensación, en el tanque de reflujo TK-103 hay un indicador de nivel LI-04, y a la salida de la bomba de reflujo P-103, encontramos un indicador de presión y dos rotámetros. El tanque colector TK-104 de condensado, tiene una termocupla TI-28 y un indicador de nivel LI-05. El tanque colector TK-105 de condensado, tiene una termocupla TI-29 y un indicador de nivel LI-06.

### 2.4.2. Operación destilación Batch

Figura 34.

Diagrama de BFD del proceso de destilación Batch



Nota. En la figura se muestra el diagrama BFD del proceso de destilación Batch.

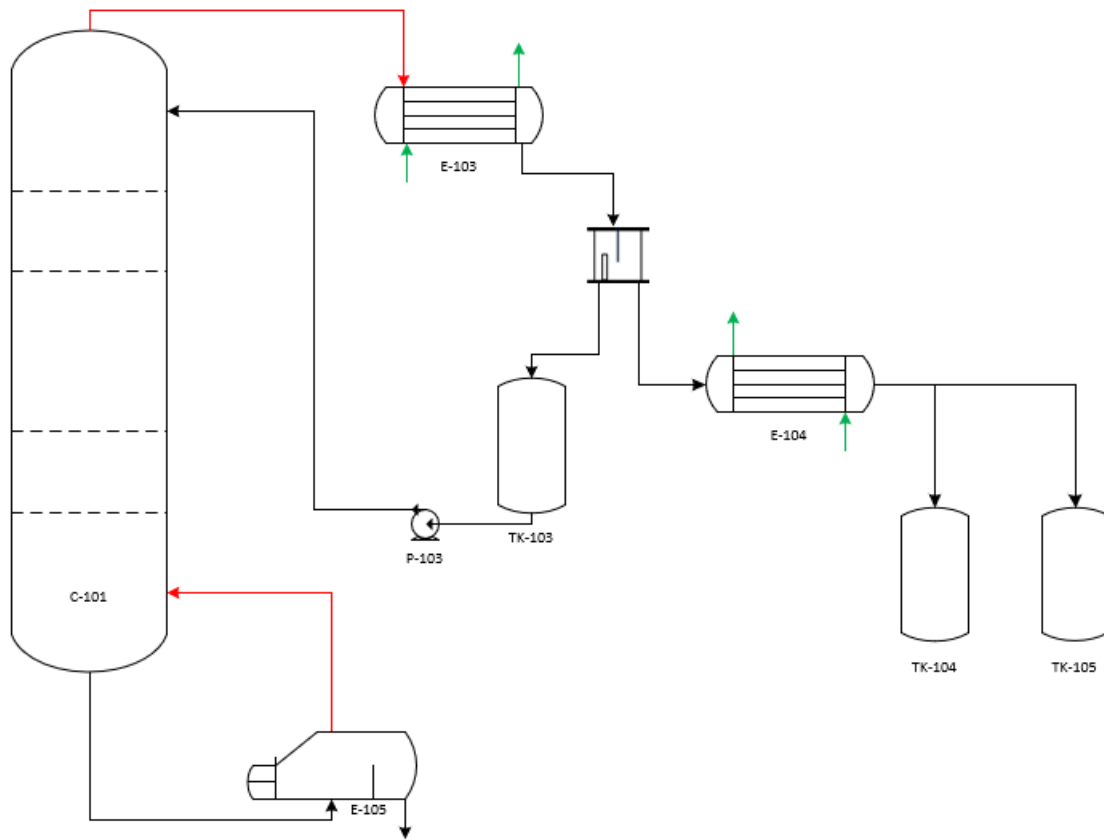
- **Descripción del BFD operación de destilación Batch**

La mezcla problema se calienta, luego pasa por el proceso de destilación en donde el producto liviano sale por cimbras y el producto pesado se queda en el fondo. En la condensación del producto liviano una parte del condensado se envía de nuevo al proceso de destilado para mantener el equilibrio entre las fases líquida y de vapor. Por último, se acondiciona el producto liviano para ser recolectado.



**Figura 35.**

*Diagrama PFD del proceso de destilación Batch*



**Nota.** En la figura se muestra el diagrama PFD del proceso de destilación Batch.

- **Descripción del PFD operación de destilación Batch**

Se carga el rehervidor E-105 con la mezcla experimental, este se calienta, y se envía a la columna de destilado C-101, por cima sale el producto liviano, pasa por el condensador E-103 para cambiar la fase del producto, una parte se envía al tanque de reflujo TK-103, este reflujo se envía a la columna de nuevo para mantener el equilibrio entre fases, a través de la bomba P-103.

La otra parte del condensado se acondiciona en el intercambiador E-104 y se almacena en los tanques TK-104 y TK-105.



- **Descripción del P&D operación de destilación Batch**

La columna de absorción cuenta con termocuplas TI-05, TI-06, TI-07, TI-08, TI-09, TI-10, TI-11, TI-12, TI-13, TI-14, TI-15, TI-16, TI-17, TI-18, TI-19, TI-20, TI-21, TI-22, TI-23, TI-24, con un indicador de presión PI-05 en el fondo.

El rehervidor E-105 cuenta con un indicador de presión PI-07 en la entrada del flujo de servicio, un indicador de presión PI-06 a la conexión con la columna de destilación, en el tanque colector TK-106, encontramos una termocupla TI-30 y un indicador de nivel LI-07, en el tanque colector TK-107, encontramos una termocupla TI-31 y un indicador de nivel LI-08

El condensador E-103 cuenta con una termocupla TI-26 en la entrada desde la columna y una termocupla TI-27 a la salida del flujo condensado, cuenta con visor de condensación, en el tanque de reflujo TK-103 hay un indicador de nivel LI-04, y a la salida de la bomba de reflujo P-103, encontramos un indicador de presión y dos rotámetros.

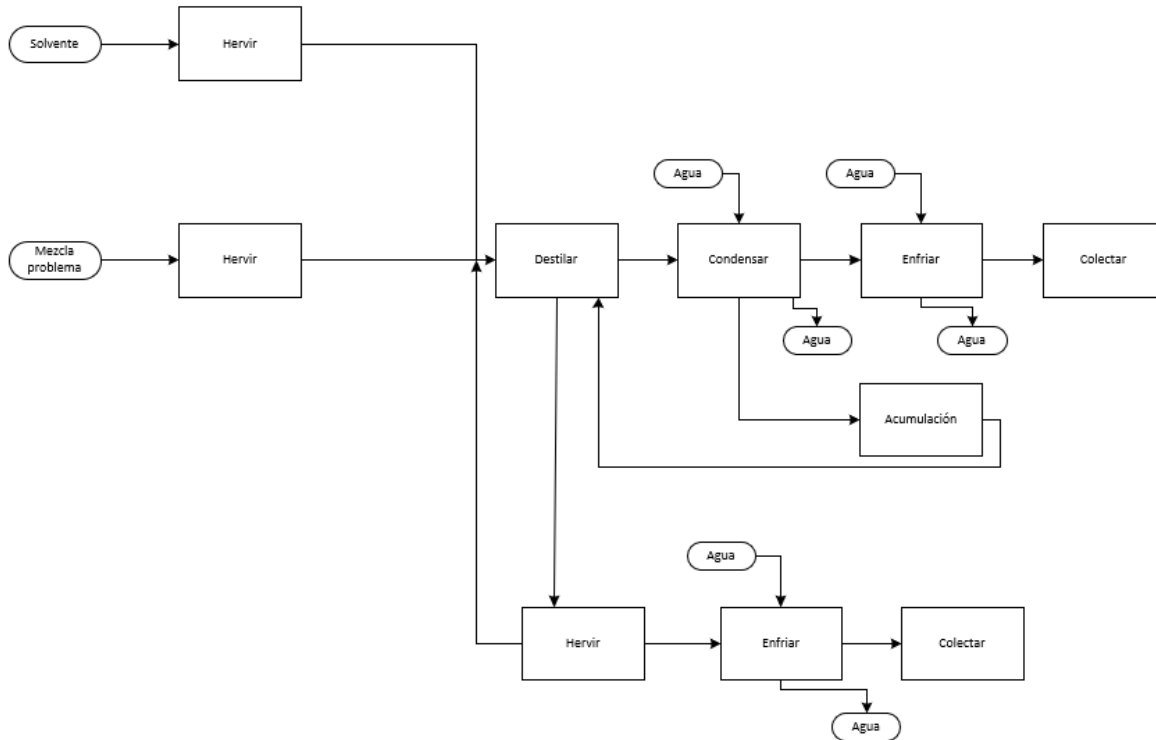
El tanque colector TK-104 de condensado, tiene una termocupla TI-28 y un indicador de nivel LI-05.

El tanque colector TK-105 de condensado, tiene una termocupla TI-29 y un indicador de nivel LI-06.

### 2.4.3. Operación destilación continua extractiva

Figura 37.

Descripción del BFD operación de destilación continua extractiva



**Nota.** En la figura se muestra el diagrama BFD del proceso de destilación continua extractiva.

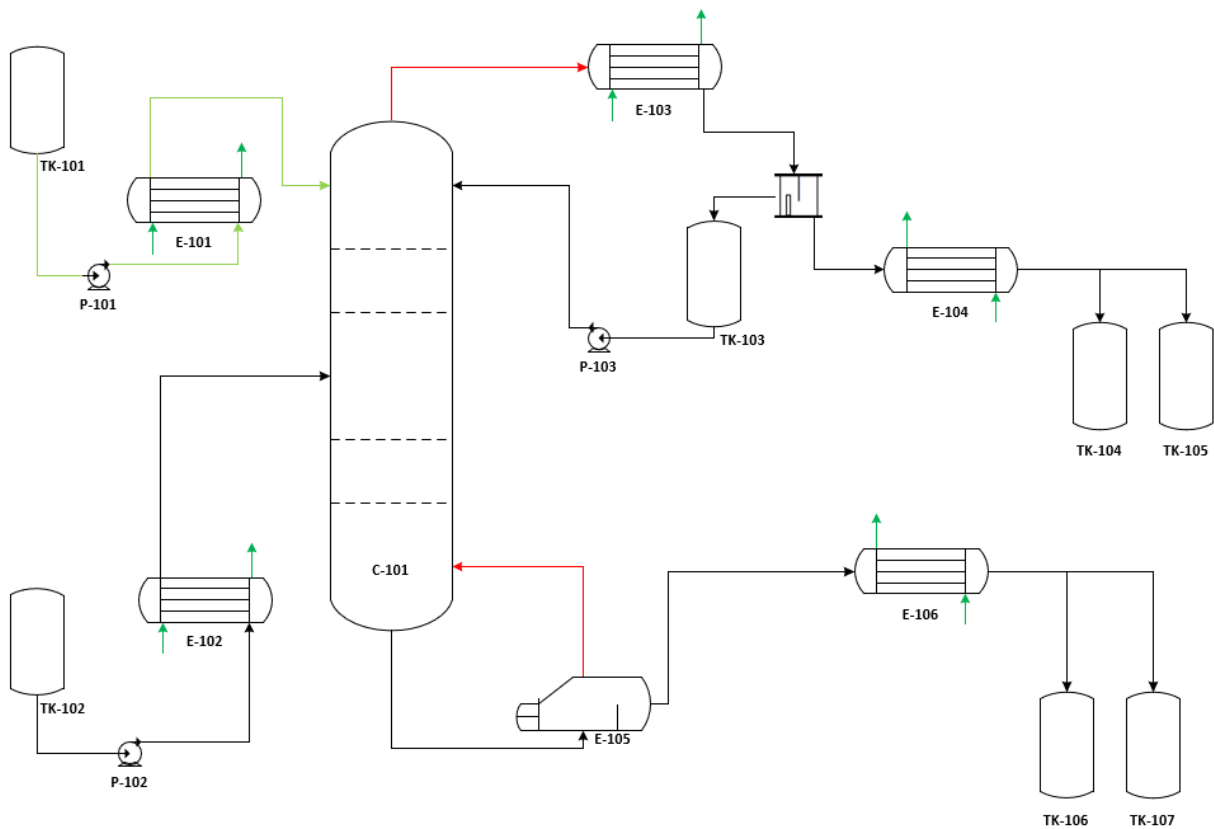
- **Descripción del BFD operación de destilación continua extractiva**

El solvente se acondiciona y se envía al destilador para su interacción.

La mezcla problema se calienta, luego pasa por el proceso de destilación en donde el producto liviano sale por cimas y el producto pesado se queda en el fondo. En la condensación del producto liviano una parte del condensado se envía de nuevo al proceso de destilado para mantener el equilibrio entre las fases líquida y de vapor. se acondiciona el producto liviano para ser recolectado. La parte de fondos se vuelve a calentar para recircularla al destilador trazas de producto liviano. El resto del producto pesado con solvente se acondiciona y recolecta.

**Figura 38.**

*Diagrama PFD del proceso de destilación continua extractiva*



**Nota.** En la figura se muestra el diagrama PFD del proceso de destilación continua extractiva.

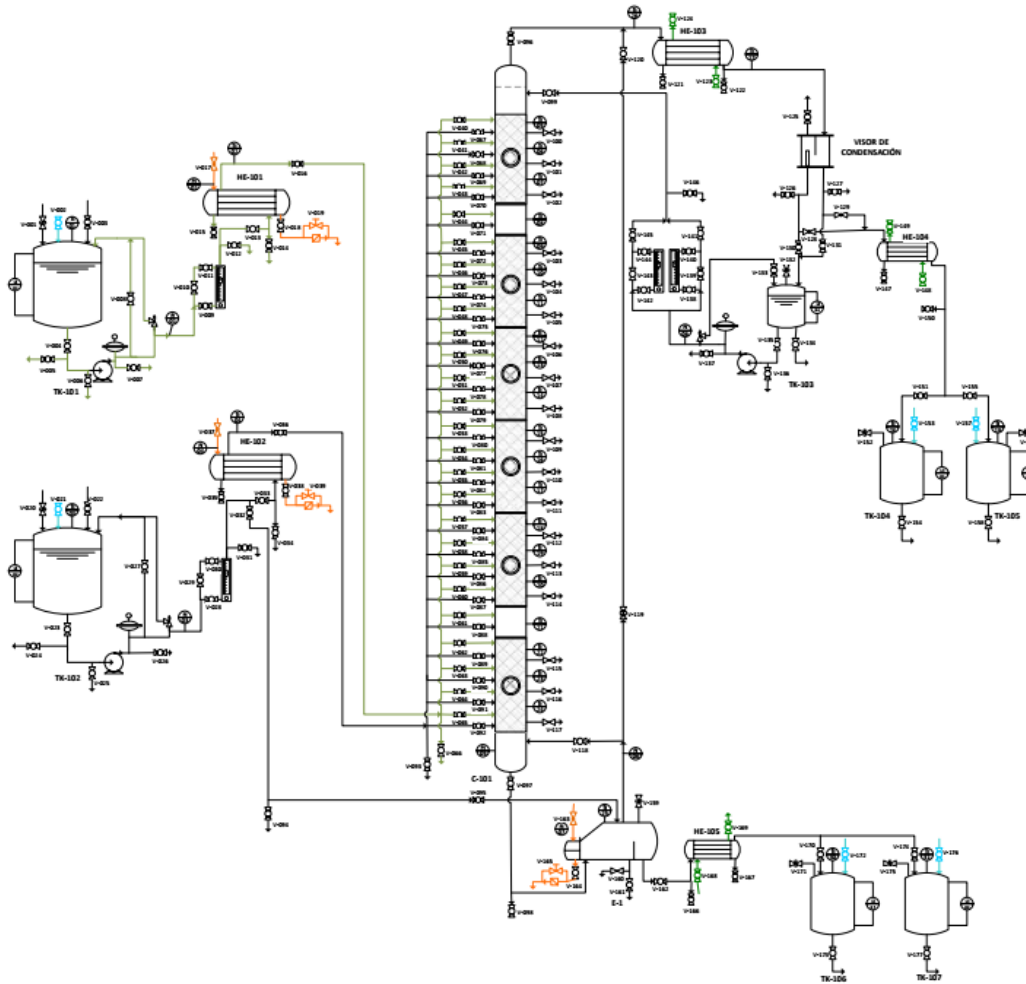
- **Descripción del PFD operación de destilación continua extractiva**

El solvente se almacena en el tanque TK-101, se envía a la columna C-101 a través de la bomba P-101, pero antes pasa por un precalentamiento en el intercambiador E-101. La mezcla problema se almacena en el tanque TK-102, se envía a la columna C-101 a través de la bomba P-102, pero antes pasa por un precalentamiento en el intercambiador E-102. En la columna C-101 el producto liviano sale por cimbras y el producto pesado más el solvente sale por fondos, el producto liviano, pasa por el condensador E-103 para cambiar la fase del producto, una parte se envía al tanque de reflujo TK-103, este reflujo se envía a la columna de nuevo para mantener el equilibrio entre fases a través del rehervidor E-105, a través de la bomba P-103. La otra parte del condensado se acondiciona en el intercambiador E-104 y se almacena en los tanques TK-104 y TK-105. EL producto pesado con solvente se calienta en el rehervidor para enviar una parte a la columna para mantener el equilibrio de fases. La otra parte del se acondiciona en el intercambiador E-106 y se almacena en los tanques TK-106 y TK-107.

**Figura 39.**

*Diagrama P&D del proceso de destilación continua extractiva*

**Diagrama P&D de destilación continua Extractiva**



**Nota.** En la figura se muestra el diagrama P&D del proceso de destilación continua extractiva.

• **Descripción del P&D operación de destilación continua extractiva**

El sistema de mezcla problema cuenta con una termocupla TI-03 y un indicador de nivel LI-02 en el tanque TK-102, a la salida de la bomba P-102 se encuentra un indicador de presión PI-03 y un rotámetro, que se conecta al intercambiador de calor E-102, que tiene un sensor de presión PI-04 y una termocupla TI-04 a la salida del flujo de la mezcla problema.

El sistema de solvente cuenta con una termocupla TI-01 y un indicador de nivel LI-01 en el tanque TK-101, a la salida de la bomba P-101 se encuentra un indicador de presión PI-01 y un rotámetro, que se conecta al intercambiador de calor E-101, que tiene un sensor de presión PI-04 y una termocupla TI-02 a la salida del flujo de solvente.

La columna de absorción cuenta con termocuplas TI-05, TI-06, TI-07, TI-08, TI-09, TI-10, TI-11, TI-12, TI-13, TI-14, TI-15, TI-16, TI-17, TI-18, TI-19, TI-20, TI-21, TI-22, TI-23, TI-24, con un indicador de presión PI-05 en el fondo.

El rehervidor E-105 cuenta con un indicador de presión PI-07 en la entrada del flujo de servicio, un indicador de presión PI-06 a la conexión con la columna de destilación, en el tanque colector TK-106, encontramos una termocupla TI-30 y un indicador de nivel LI-07, en el tanque colector TK-107, encontramos una termocupla TI-31 y un indicador de nivel LI-08

El condensador E-103 cuenta con una termocupla TI-26 en la entrada desde la columna y una termocupla TI-27 a la salida del flujo condensado, cuenta con visor de condensación, en el tanque de reflujo TK-103 hay un indicador de nivel LI-04, y a la salida de la bomba de reflujo P-103, encontramos un indicador de presión y dos rotámetros.

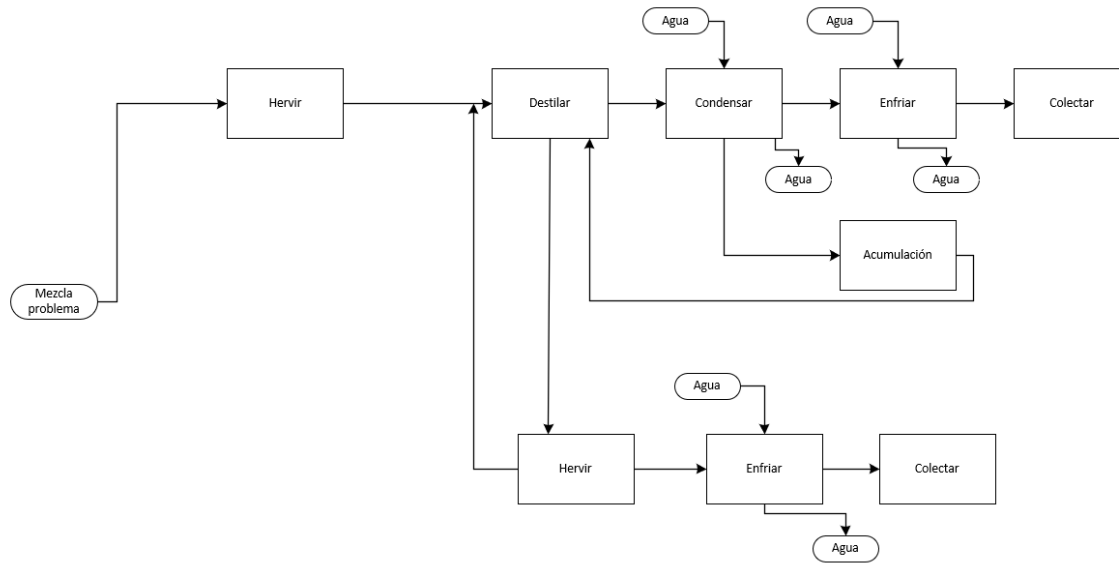
El tanque colector TK-104 de condensado, tiene una termocupla TI-28 y un indicador de nivel LI-05.

El tanque colector TK-105 de condensado, tiene una termocupla TI-29 y un indicador de nivel LI-06.

#### 2.4.4. Operación destilación continua azeotrópica

Figura 40.

Diagrama BFD del proceso de destilación continua azeotrópica



**Nota.** En la figura se muestra el diagrama BFD del proceso de destilación continua azeotrópica.

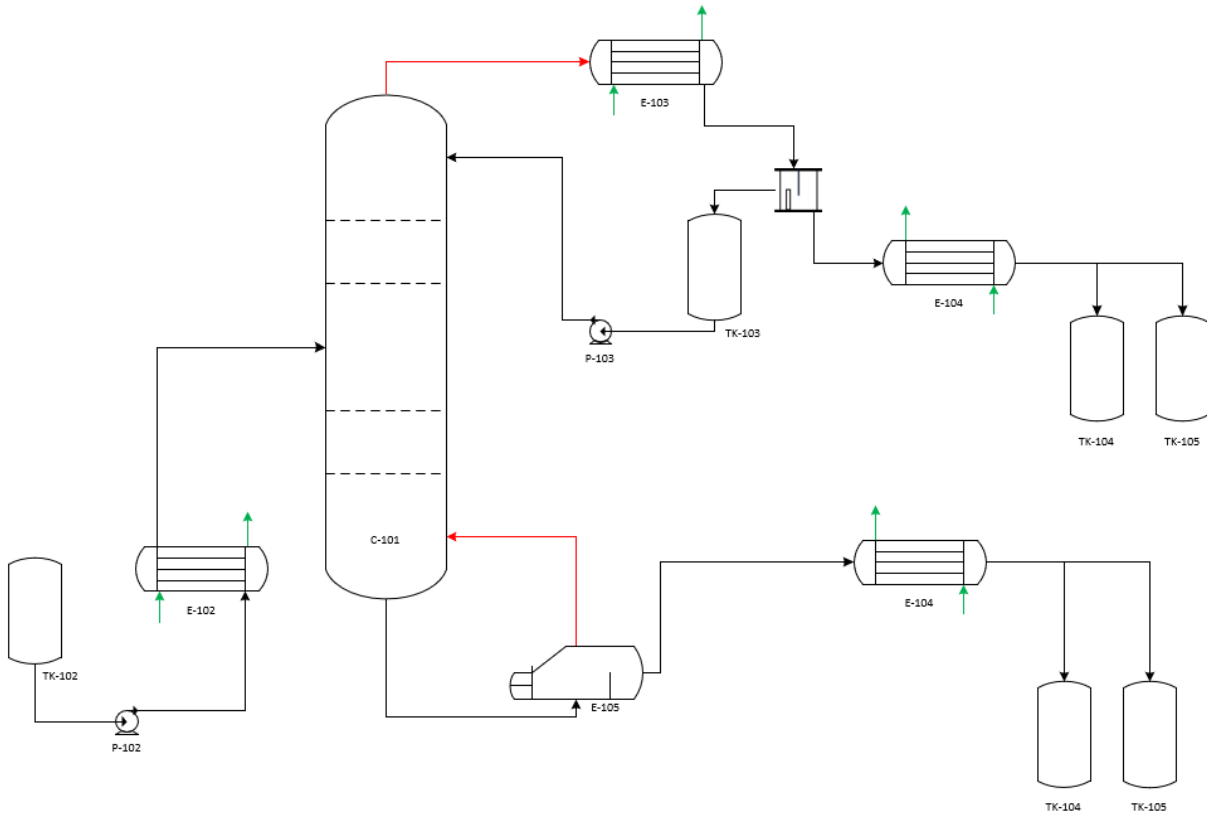
- **Descripción del BFD operación de destilación continua azeotrópica**

La mezcla problema se calienta, luego pasa por el proceso de destilación en donde el producto liviano sale por cimbras y el producto pesado se queda en el fondo. En la condensación del producto liviano una parte del condensado se envía de nuevo al proceso de destilado para mantener el equilibrio entre las fases líquida y de vapor. Se acondiciona el producto liviano para ser recolectado. La parte de fondos se vuelve a calentar para recircularla al destilador trasas de producto liviano. El resto del producto pesado se acondiciona y recolecta.



**Figura 41.**

*Diagrama PFD del proceso de destilación continua azeotrópica*



**Nota.** En la figura se muestra el diagrama PFD del proceso de destilación continua azeotrópica.

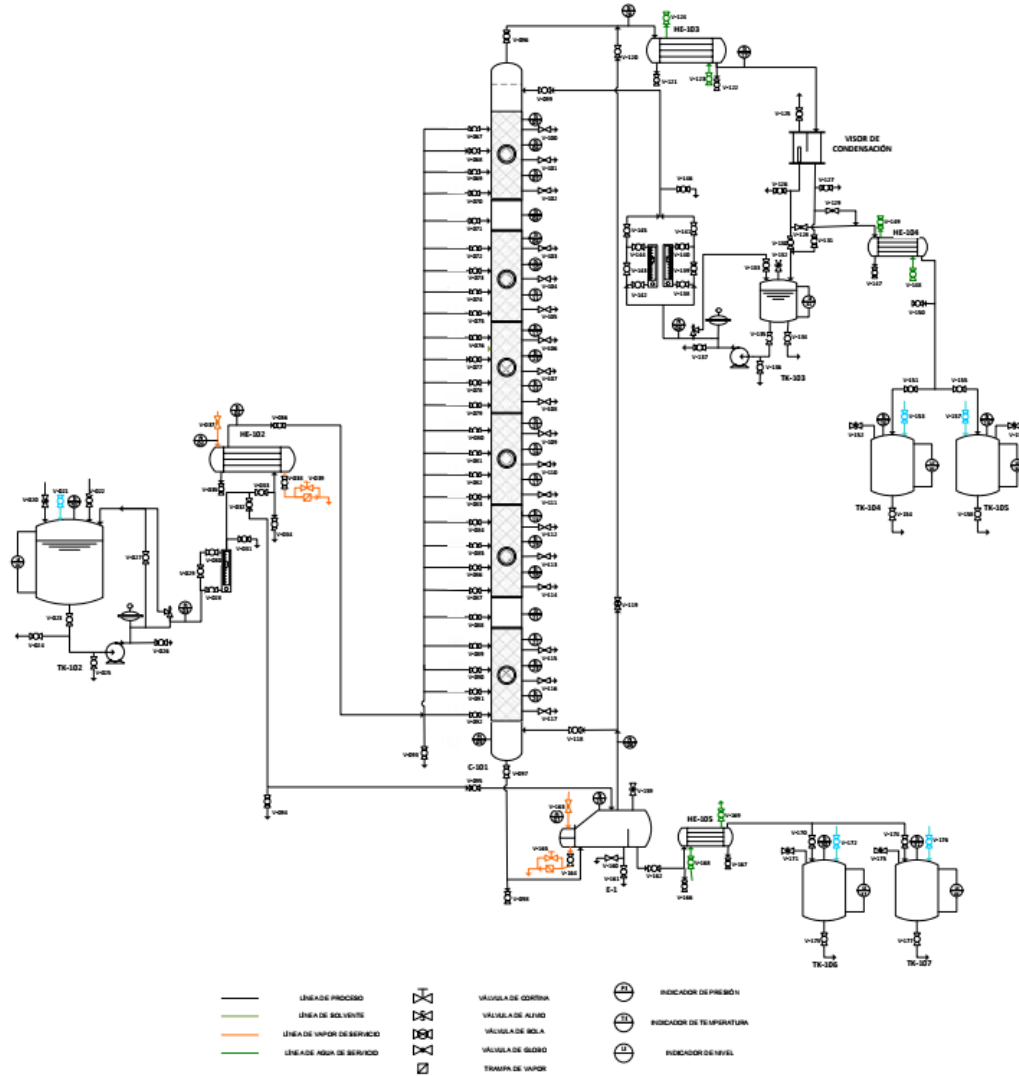
- **Descripción del PFD operación de destilación continua azeotrópica**

La mezcla problema se almacena en el tanque TK-102, se envía a la columna C-101 a través de la bomba P-102, pero antes pasa por un precalentamiento en el intercambiador E-102. En la columna C-101 el producto liviano sale por cimbras y el producto pesado sale por fondos, el producto liviano, pasa por el condensador E-103 para cambiar la fase del producto, una parte se envía al tanque de reflujo TK-103, este reflujo se envía a la columna de nuevo para mantener el equilibrio entre fases a través del rehervidor E-105, a través de la bomba P-103. La otra parte del condensado se acondiciona en el intercambiador E-104 y se almacena en los tanques TK-104 y TK-105. EL producto pesado con solvente se calienta en el rehervidor para enviar una parte a la columna para mantener el equilibrio de fases. La otra parte del se acondiciona en el intercambiador E-106 y se almacena en los tanques TK-106 y TK-107.

Figura 42.

Diagrama P&D del proceso de destilación continua azeotrópica

### Diagrama P&D proceso de destilación AZEOTRÓPICA



Nota. En la figura se muestra el diagrama P&D del proceso de destilación continua azeotrópica.

- **Descripción del P&D operación de destilación continua azeotrópica**

El sistema de mezcla problema cuenta con una termocupla TI-03 y un indicador de nivel LI-02 en el tanque TK-102, a la salida de la bomba P-102 se encuentra un indicador de presión PI-03 y un rotámetro, que se conecta al intercambiador de calor E-102, que tiene un sensor de presión PI-04 y una termocupla TI-04 a la salida del flujo de la mezcla problema.

La columna de absorción cuenta con termocuplas TI-05, TI-06, TI-07, TI-08, TI-09, TI-10, TI-11, TI-12, TI-13, TI-14, TI-15, TI-16, TI-17, TI-18, TI-19, TI-20, TI-21, TI-22, TI-23, TI-24, con un

indicador de presión PI-05 en el fondo.

El rehervidor E-105 cuenta con un indicador de presión PI-07 en la entrada del flujo de servicio, un indicador de presión PI-06 a la conexión con la columna de destilación, en el tanque colector TK-106, encontramos una termocupla TI-30 y un indicador de nivel LI-07, en el tanque colector TK-107, encontramos una termocupla TI-31 y un indicador de nivel LI-08

El condensador E-103 cuenta con una termocupla TI-26 en la entrada desde la columna y una termocupla TI-27 a la salida del flujo condensado, cuenta con visor de condensación, en el tanque de reflujo TK-103 hay un indicador de nivel LI-04, y a la salida de la bomba de reflujo P-103, encontramos un indicador de presión y dos rotámetros.

El tanque colector TK-104 de condensado, tiene una termocupla TI-28 y un indicador de nivel LI-05.

El tanque colector TK-105 de condensado, tiene una termocupla TI-29 y un indicador de nivel LI-06.

#### 2.4.5. Tabla de parámetros y variables planta de absorción de gases

Tabla 7.

*Tabla de parámetros y variables planta de absorción de gases*

Equipo	Código	Parámetros	Descripción	Variables	Descripción	Rangos de operación
Tanque de mezcla problema	TK-102	Volumen	Espacio destinado para el almacenamiento del fluido	_____	_____	Capacidad de 50 L
Bomba dosificadora	P-102	Flujo de alimentación	Control de la distribución de las sustancias	_____	_____	_____
Intercambiador de calor	E-102	Geometría	Disposición del diseño para el flujo de los fluidos	_____	_____	Arreglo de tubos y coraza
Tanque de solvente	TK-101	Volumen	Espacio destinado para el almacenamiento del fluido	_____	_____	Capacidad de 50 L

<b>Bomba dosificadora</b>	P-101	Flujo de alimentación	Control de la distribución de las sustancias	_____	_____	_____
<b>Intercambiador de calor</b>	E-101	Geometría	Disposición del diseño para el flujo de los fluidos	_____	_____	Arreglo de tubos y coraza
<b>Columna de destilación</b>	C-101	Altura y distribución del empaque	Condición de diseño para las partículas sólidas en las cuales circulara el fluido	_____	_____	3 secciones de 1 m de altura y 4" de diámetro, altura total de 6m empacada al azar
				Presión	Control de la cantidad de fluido que circula en el proceso por unidad de tiempo	_____
<b>Condensador</b>	E-103	Geometría	Disposición del diseño para el flujo de los fluidos	_____	_____	_____
<b>Rehervidor</b>	E-105	Geometría	Disposición del diseño para el flujo de los fluidos	_____	_____	_____
<b>Intercambiador de calor</b>	E-104	Geometría	Disposición del diseño para el flujo de los fluidos	_____	_____	arreglo de coraza y tubos
		Área de intercambio térmico	Superficie de transferencia térmica	_____	_____	
<b>Visor de condensación</b>	-----	Volumen	Espacio destinado para el almacenamiento del fluido	_____	_____	_____
<b>Tanque de acumulación</b>	TK-103	Volumen	Espacio destinado para el	_____	_____	_____

			almacenamiento del fluido			
<b>Bomba dosificadora</b>	P-103	Flujo de alimentación	Control de la distribución de las sustancias	_____	_____	_____
<b>Tanque colector 1</b>	TK-104	Volumen	Espacio destinado para el almacenamiento del fluido	_____	_____	_____
<b>Tanque colector 2</b>	TK-105	Volumen	Espacio destinado para el almacenamiento del fluido	_____	_____	_____

**Nota.** La tabla representa los parámetros y las variables por equipo en la planta de Destilación continua.

En esta tabla encontramos los parámetros y variables por equipo en la planta de destilación continua, así como la descripción y los rangos de operación. Las líneas en la tabla indican la información que no se tiene en el momento del equipo. Por lo que se recomienda una caracterización de estas características.

#### **2.4.6. Caracterización del equipo**

La planta de destilación continua carece de información en todos sus equipos, por lo que es obligatorio realizar la caracterización de las propiedades de funcionamiento, como de diseño de los equipos de la planta.

### 3. SEGURIDAD DE EQUIPOS

Cuando hablamos de seguridad industrial, nos referimos al sistema de normas de obligado cumplimiento, cuyo objeto es prevenir y limitar los riesgos, así como prevenir los accidentes que puedan causar daños a las personas, los bienes o el medio ambiente con motivo de las actividades industriales o del uso, funcionamiento y mantenimiento de las instalaciones. O equipo, así como la producción de productos industriales, uso o consumo, almacenamiento o eliminación.

Para tener presentes las problemáticas que ponen en riesgo, a los equipos y al personal que los va a operar, se necesita realizar un análisis de los riesgos y desviaciones operativas en los equipos pertenecientes al Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE). Se realizaron análisis de predicción de posibles riesgos (WHAT IF), un análisis de funcionalidad operativa.(HAZOP). Encontraremos ejemplos de What if en la tabla 4, de hazop en la tabla 5 y de la metodología bow-tie en la figura 19.

Los análisis completos para cada equipo perteneciente al Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE), se encuentran en los anexos 1 y 2.

Parte de la seguridad del proceso, también incluye el tratamiento y debido control de los posibles residuos que pueden generar los equipos. Para esto utilizamos el análisis RESPEL que nos permite identificar estos residuos peligrosos y las etiquetas para clasificarlos.

A continuación, se enseñan ejemplos para los análisis What if, hazop y bow-tie.

### 3.1. What if de los equipos de CEPURE

#### 3.1.1. What if secador de bandejas

En esta tabla encontramos una sección para los posibles What if en el secador de bandejas, las consecuencias que pueden generar, el grado de riesgo y las recomendaciones a tomar.

**Tabla 8.**

*Tabla de What if del secador de bandejas*

Área del Centro de Procesos	¿Qué pasaría si ...	Consecuencias	Riesgo	Recomendaciones
<b>Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE) – Secador de bandejas</b>	¿Si la temperatura del secador es demasiado alta o demasiado baja ¿	Dificultad en el proceso de separación de la humedad del material de interés	<b>Medio</b>	Verificar las temperatura óptima de secado. Instalar un lazo de control de temperatura y humedad.
		Mayor desgaste en el equipo	<b>Medio</b>	
	¿Si se presentan fallas en el sistema de ventilación?	No es posible circular el aire con un flujo paralelo a la muestra	<b>Medio</b>	Realizar mantenimiento preventivo y correctivo al sistema de ventilación.
		Dificultad en el proceso de separación de la humedad del material de interés	<b>Alto</b>	
	¿Si se presentan fallas en el sistema de aspersores?	No es posible controlar la humedad del aire de entrada al proceso de secado	<b>Medio</b>	Realizar mantenimiento preventivo y correctivo al sistema de aspersores.
	Si el sistema de calentamiento no funciona	Las resistencias no son capaces de proveer la potencia necesaria y el equipo no está puesta en marcha	<b>Medio</b>	Verificar que el sistema de resistencias provea la potencia necesaria para el equipo. Realizar mantenimiento del sistema de calentamiento.
		No es posible separar la humedad del material de interés	<b>Alto</b>	

**Nota.** La tabla representa la estructura del secador de bandejas como referencia. Tomado de: M. S. Vargas Jiménez y M. Espitia Velandia, “Propuesta de un plan de gestión de riesgo en el centro de procesos e innovación para la industria sostenible (CEPIIS) de la Universidad de América utilizando las herramientas de análisis de riesgo what if, hazop y la metodología bow-tie”, Bogotá D.C. Fundación Universidad de América, 2022. [PDF]. Disponible: <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/9033> [Último acceso: 21 noviembre 2022].

## 3.2. Hazop de los equipos de CEPURE

### 3.2.1. Hazop secador de bandejas

Esta tabla es más completa ya que tiene en cuenta los parámetros de operación, las etapas de operación del equipo, las posibles fallas con su respectiva consecuencia, los sistemas de alerta o control que detecten esta falla, la valoración de riesgo y las medidas de solución.

**Tabla 9.**

*Hazop del secador de bandejas.*

<b>Proyecto</b>	Secador de bandejas SB500						
<b>Nodo</b>	Secador de bandejas					<b>P&amp;ID</b>	Figura 30
<b>Descripción del nodo</b>	Cámara de secado con un sistema de bandejas construido en acero Inox 304					<b>Fecha</b>	31/05/2022
<b>Intención del nodo</b>	Límite a las condiciones requeridas del proceso sin afectaciones a la integridad del secador						
<i>Desviación</i>		<i>paso/ etapa</i>	<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvaguardas</i>	<i>Valoración</i>	<i>Recomendaciones</i>
<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>						
<b>NO</b>	Flujo	Entrada de aire	- El ventilador centrífugo no se encuentra encendido	- No es posible realizar el proceso de secado ya que no hay entrada de aire	Indicador de velocidad ubicado en el sistema de ductos	<b>3<sup>a</sup></b>	- Implementar un indicador de flujo a la entrada del ducto, después del ventilador centrífugo
			- Se presentan obstrucciones en el filtro del sistema de toma de aire	-Variación de las condiciones óptimas de operación			- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza en el filtro del sistema
				- Desgaste del equipo			- Verificar el adecuado funcionamiento del ventilador



<b>MÁS</b>			- Se presentan fallas en el ventilador centrífugo	- El proceso de secado no se llevará a cabo adecuadamente	<b>2C</b>	- Implementar un indicador de flujo a la entrada del ducto, después del ventilador centrífugo
			- Aumento repentino en el variador de velocidad del ventilador	-Flujo de aire excesivo y gasto de energía innecesario		- Verificar el adecuado funcionamiento del ventilador
			- Fallas en el indicador de velocidad	-Variación de las condiciones óptimas de operación		- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza al variador de velocidad del ventilador
				- Mayor desgaste del filtro y ventilador en el equipo		
<b>MENOS</b>			- Se presentan fallas en el ventilador centrífugo	- El proceso de secado no será eficiente	<b>2C</b>	- Implementar un indicador de flujo a la entrada del ducto, después del ventilador centrífugo
			- Disminución repentina en el variador de velocidad del ventilador	-Variación de las condiciones óptimas de operación		- Verificar el adecuado funcionamiento del ventilador
			- Posibles fugas en el ducto por donde se transporta el aire	- Mayor tiempo de residencia en el equipo		- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza al

							variador de velocidad del ventilador	
<b>MÁS</b>	Humedad	Entrada de aire	- La ubicación de la planta es en los cerros, cuyo aire ambiente tiene una humedad relativa alta	- El aire caliente de entrada no puede retener por completo el alto contenido de humedad del material a secar	Indicador de humedad ubicado en el sistema de ductos	<b>2B</b>	- Verificar la humedad relativa del aire ambiente en donde se encuentre situado el secador	
				- Mayor flujo de aire caliente			- Realizar mantenimiento preventivo al indicador de humedad	
				- Mayor tiempo de residencia en el equipo			-Ajustar la Humedad relativa a las condiciones requeridas en el proceso de secado	
<b>MENOS</b>		Salida de aire	- El proceso de secado no es eficiente	- El material a secar aún contiene humedad			<b>2B</b>	- Verificar el adecuado funcionamiento del secador de bandejas
			-Humedad relativa baja	- Mayor flujo de aire caliente suministrado al sistema				- Realizar mantenimiento preventivo al indicador de humedad
				- Mayor tiempo de residencia en el equipo				-Ajustar la Humedad relativa a las condiciones requeridas en el proceso de secado
<b>MÁS</b>	Temperatura	Secador de bandejas	- Falla en el regulador de potencia que permite controlar la temperatura del	- Posible afectación al material que se desea secar debido a la alta temperatura del aire caliente	Indicador de temperatura ubicado en sistema	<b>2C</b>		- Incorporar alarma por alta temperatura (TAH) según las condiciones preestablecidas de operación

		aire con las resistencias			
		-Falta de control en el suministro de flujo de aire	-Variación de las condiciones óptimas de operación		- Realizar mantenimiento preventivo al indicador de temperatura
			- Mayor desgaste del equipo		
<b>MENOS</b>		- Falla en el regulador de potencia que permite controlar la temperatura del aire con las resistencias	- El proceso de secado no será eficiente		- Incorporar alarma por baja temperatura (TAL) según las condiciones preestablecidas de operación
		-Falta de control en el suministro de flujo de aire	-Variación de las condiciones óptimas de operación	<b>2B</b>	- Realizar mantenimiento preventivo al indicador de temperatura
			- Mayor tiempo de residencia en el equipo		
			- Mayor flujo de aire caliente		

**Nota.** La tabla representa la estructura del Hazop del secador de bandejas a modo de ejemplo. Tomado de: M. S. Vargas Jiménez y M. Espitia Velandia, “Propuesta de un plan de gestión de riesgo en el centro de procesos e innovación para la industria sostenible (CEPIIS) de la Universidad de América utilizando las herramientas de análisis de riesgo what if, hazop y la metodología bow-tie”, Bogotá D.C. Fundación Universidad de América, 2022. [PDF]. Disponible: <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/9033> [Último acceso: 21 noviembre 2022].

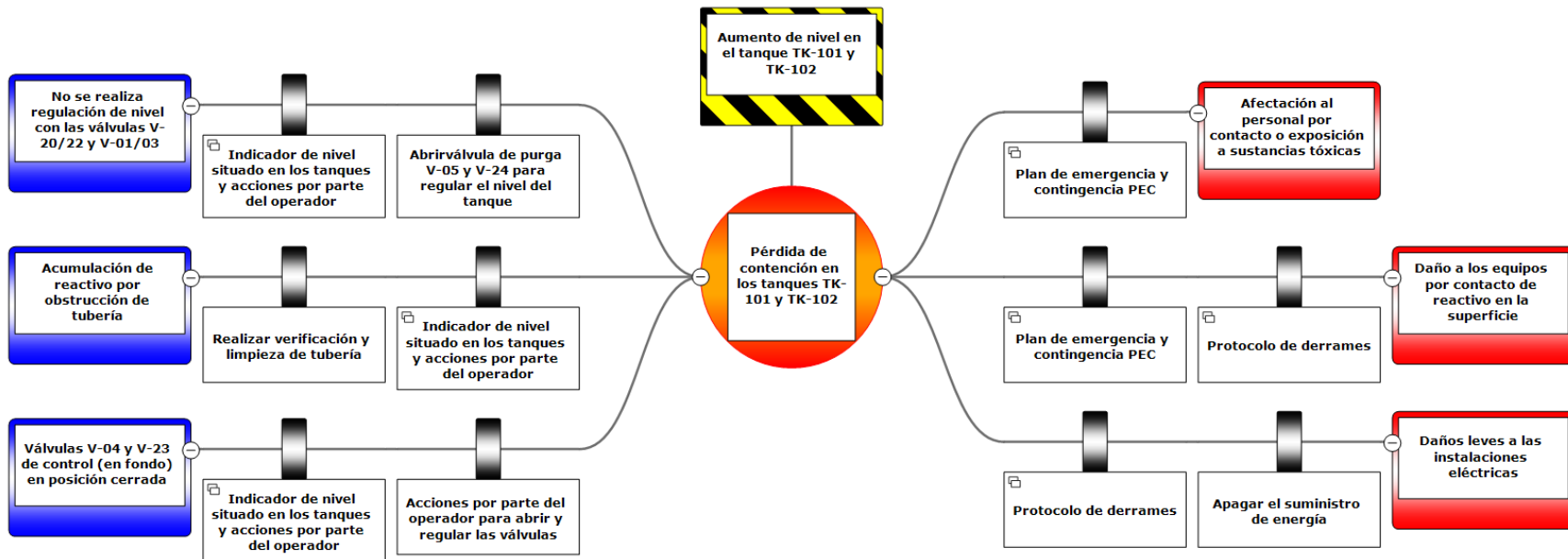
### 3.3. Metodología bow-tie

#### 3.3.1. Diagrama bow-tie ejemplo

Este diagrama con estilo de corbata, reúne alrededor de una falla central en un equipo específico, las posibles causas de esta falla, los sistemas de control y solución para contrarrestar la posible causa de falla. Por otro lado, nos enseña los planes de contingencia para evitar consecuencias de riesgo en el equipo.

Figura 43.

Metodología bow-tie de la planta de destilación.



**Nota.** La tabla representa la estructura de la planta de destilación continua a modo de ejemplo. Tomado de: M. S. Vargas Jiménez y M. Espitia Velandia, "Propuesta de un plan de gestión de riesgo en el centro de procesos e innovación para la industria sostenible (CEPIIS) de la Universidad de América utilizando las herramientas de análisis de riesgo what if, hazop y la metodología bow-tie", Bogotá D.C. Fundación Universidad de América, 2022. [PDF]. Disponible: <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/9033> [Último acceso: 21 noviembre 2022].

### **3.4. Diagramas de flujo como semáforo de seguridad ecológico**

Se realizó una evolución a la forma en que el artículo “El diagrama de flujo como semáforo de seguridad ecológica de los experimentos de laboratorio, Vargas (2016)” [25], para implementarlo en la elaboración de los manuales.

En donde se encontraron que se puede realizar un análisis de los 12 principios de la química verde antes de cada práctica propuesta para desarrollarse en los equipos de CEPURE. Se añaden las consideraciones de evaluación de los principios, los símbolos para el diseño de los diagramas de flujo y los criterios de evaluación de los principios y un código de color para verificar que principios se cumplen.

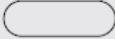
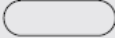


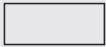


#### ***3.4.1. Consideraciones para la evaluación de los 12 principios***

Antes del trabajo experimental se requiere investigar y realizar las actividades que se describen a continuación:

- Para evaluar los principios 1, 2, 5 y 8 (P1, P2, P5 y P8) es necesario conocer todos los reactivos y sustancias auxiliares a utilizar, sus cantidades y/o concentraciones, transformaciones realizadas, productos, subproductos y residuos obtenidos en cada etapa del proceso.
- Evaluar el nivel de los riesgos a la salud, al ambiente y a la seguridad mediante los pictogramas y rombos de seguridad de reactivos, sustancias auxiliares, productos y residuos: P3, P4 y P12.
- Investigar las condiciones de reacción de temperatura, presión y tiempo que deben mantenerse durante el desarrollo experimental, P6.
- Averiguar si las materias primas son renovables, P7, e investigar si los residuos y productos generados son bio-degradables, P10.
- Conocer el uso de catalizadores en lugar de reactivos estequiométricos, P9.
- Finalmente es importante considerar el desarrollo de metodologías analíticas, P11 en esta métrica, ya que en muchos laboratorios de enseñanza experimental se aplica para el seguimiento de las reacciones o única-mente para adquirir la competencia de aplicar este principio en la evaluación del acercamiento verde de un experimento. [25]

**Figura 44.**

*Simbología para diagramas de flujo*

Símbolo	Significado	Aplicación en los experimentos de laboratorio
	Inicio del proceso	Indica el inicio de un diagrama; de este solo puede salir una línea de flujo. Lleva el título general o de cada etapa del experimento
	Final del proceso	Indica el final del experimento. El proceso terminará con el tratamiento y disposición de los residuos
	Entrada general	Emplear únicamente para indicar los reactivos que entran al proceso, el volumen, el peso y la concentración
	Salida general	Indica los materiales que salen del proceso (productos, residuos, etc.), su volumen, peso y concentración, así como los componentes y sus composiciones respectivas. Puede tener varias flechas de salida para indicar biodegradabilidad, reutilización, tratamiento y/o disposición de los residuos
	Acción/proceso general	Contiene la instrucción general que el alumno debe realizar para el desarrollo del experimento y del tratamiento y disposición de los residuos. Si es posible debe indicar la transformación de los reactantes
	Decisión	Sirve para comparar dos datos. Dependiendo del resultado (falso o verdadero) se toma la decisión de seguir un camino del diagrama u otro
	Línea de flujo	Indica la dirección de flujo del proceso

**Nota.** La tabla representa los símbolos que se utilizan en los diagramas de flujo y la descripción de cada símbolo. Tomado de Y. M. Vargas-Rodríguez, A. Obaya Valdivia, S. Lima Vargas, A. Hernández Escamilla, R. Miranda Ruvalcaba y G. I. Vargas Rodríguez, "El diagrama de flujo como semáforo de seguridad", México, D.F., México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2015. [PDF]. Disponible: <https://revistas.unam.mx/index.php/req/article/view/63350/55610> [Último acceso: 24 enero 2023].

**Figura 45.***Criterios para evaluar los principios de química verde en los experimentos*

**Tabla 2** Criterios para evaluar los principios de química verde en los experimentos de laboratorio

N.º	Principios de la química verde	Criterio para evaluar cada principio
P1	Prevención de residuos	La eficiencia, eficiencia en masa o eficiencia en volumen debe ser mínima (microescala, semimicro). <i>Evaluar <math>E_m</math> o <math>E_v</math></i>
P2	Economía atómica	La economía atómica debe ser cercana al 100%. <i>Evaluar EA</i>
P3	Usar metodologías que generen productos con toxicidad reducida	La metodología experimental debe utilizar y generar sustancias sin toxicidad. <i>Evaluar riesgos a la salud</i>
P4	Generar productos eficaces pero no tóxicos	Los productos y/o residuos no deben ser tóxicos. <i>Evaluar riesgos a la salud</i>
P5	Reducir el uso de sustancias auxiliares	No utilizar sustancias auxiliares; si se utilizan, no deben presentar riesgos para la salud y el ambiente. <i>Evaluar riesgos a la salud y al medio ambiente</i>
P6	Disminuir el consumo energético	Los experimentos deben preferentemente llevarse a cabo a temperatura y presión ambiente
P7	Utilizar materias primas renovables	La materia prima ha de ser preferiblemente renovable
P8	Evitar derivados innecesarios	No utilizar derivados. <i>Evaluar riesgos a la salud y al ambiente</i>
P9	Potenciar la catálisis	Evaluar en el siguiente orden: emplear catálisis heterogénea, catálisis homogénea, no es necesaria la catálisis. <i>Evaluar toxicidad del catalizador o sistema catalítico</i>
P10	Generar productos biodegradables	Los productos químicos y/o residuos deben ser biodegradables. Si no es biodegradable, <i>evaluar toxicidad</i> al ambiente
P11	Desarrollar metodologías analíticas para el seguimiento en tiempo real de los procesos	Utilizar metodologías fisicoquímicas para el seguimiento del experimento. Estas no deben presentar riesgos para la salud y el ambiente. <i>Evaluar riesgos a la salud y al ambiente</i>
P12	Minimizar el potencial de accidentes químicos	Las sustancias utilizadas deben presentar el riesgo mínimo de accidentes químicos. <i>Evaluar riesgos de accidentes químicos</i>

Para cumplir con los principios, el nivel de riesgo a la salud y de accidentes químicos debe ser uno o menor de uno.

**Nota.** La figura representa los criterios de evaluación y su respectivo criterio a evaluar. Tomado de: Y. M. Vargas-Rodríguez, A. Obaya Valdivia, S. Lima Vargas, A. Hernández Escamilla, R. Miranda Ruvalcaba y G. I. Vargas Rodríguez, “El diagrama de flujo como semáforo de seguridad”, México, D.F., México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2015. [PDF]. Disponible: <https://revistas.unam.mx/index.php/req/article/view/63350/55610> [Último acceso: 24 enero 2023].

**Figura 46.**

*Código de color en función del número de principios de la química verde que cumple el experimento*

**Tabla 3** Código de color en función del número de principios de la química verde que cumple el experimento

N.º PQVCE	Color observado	Modelo de color RGB	Modelo de color CMYK
0		237, 28, 37	0.00, 0.882, 0.844, 0.071
1		240, 81, 35	0.00, 0.663, 0.854, 0.059
2		237, 110, 5	0.00, 0.54, 0.98, 0.07
3		243, 146, 0	0.00, 0.40, 1.00, 0.05
4		249, 179, 0	0.00, 0.28, 1.00, 0.02
5		255, 210, 0	0.00, 0.18, 1.00, 0.00
6		255, 237, 0	0.00, 0.07, 1.00, 0.00
7		239, 227, 0	0.00, 0.05, 1.00, 0.06
8		214, 217, 0	0.01, 0.00, 1.00, 0.15
9		187, 207, 0	0.10, 0.00, 1.00, 0.19
10		157, 196, 26	0.20, 0.00, 0.87, 0.23
11		122, 185, 41	0.34, 0.00, 0.78, 0.27
12		79, 174, 50	0.55, 0.00, 0.71, 0.32

N.º PQVCE: número de principios de la química verde que cumple el experimento.

**Nota.** La figura representa el código de color para los resultados de la evolución de los criterios de la química verde. Tomado de: Y. M. Vargas-Rodríguez, A. Obaya Valdivia, S. Lima Vargas, A. Hernández Escamilla, R. Miranda Ruvalcaba y G. . I. Vargas Rodríguez, “El diagrama de flujo como semáforo de seguridad”, México, D.F., México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2015. [PDF]. Disponible: <https://revistas.unam.mx/index.php/req/article/view/63350/55610> [Último acceso: 24 enero 2023].



### 3.5. Residuos a trabajar en los equipos de CEPURE

- **Secador de bandejas**

La unidad en la cual se presentará una menor cantidad y variedad de residuos es el secador de bandejas, este equipo permite variar la velocidad el ventilador, así como modificar la humedad del aire en el interior del sistema permitiendo de esta manera realizar una transferencia de masa adecuada y controlada mediante las celdas de carga. Por otra parte, se encuentra construido en acero inoxidable, lo que aumenta la vida útil y permite la aplicación en investigación, docencia y producción a pequeña escala.

**Tabla 10.**

*Cuadro de sustancias a trabajar en el secador de bandejas del CEPIIS.*

<b>LISTADO DE SUSTANCIAS A TRABAJAR EN EL CEPIIS</b>		
<b>Unidad / Centro</b>	<b>Sustancias / Compuestos</b>	<b>Notas</b>
Secador de bandejas	Residuos de Biomasa, residuos de alimentos	Puede ser empleado para el secado de una gran variedad de productos (alimentos, minerales, biomasa)

**Nota.** La tabla representa las sustancias que se pueden utilizar en el secador de bandejas. Tomado de: C. D. Ortiz Mejía, “Diseño del protocolo para el sistema de gestión integral de residuos peligrosos (Respel) en el centro de procesos e innovación para la industria sostenible de la fundación universidad de américa”, Bogotá D.C. Fundación Universidad de América, 2022. [PDF]. Disponible: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/9088/1/6162993-2022-2-IQ.pdf> [Último acceso: 21 noviembre 2022].

- **Planta de extracción sólido - líquido y líquido – líquido**

Uno de los equipos más robustos del Centro de Procesos e Innovación para la Industria Sostenible es la unidad PESL que corresponde a la planta de extracción Sólido - Líquido, este tipo de operación unitaria es utilizada ampliamente en la industria debido a su aplicación en la transferencia de masa ya que aprovecha el principio de la diferencia de concentración del soluto y el solvente.

**Tabla 11.**

*Cuadro de sustancias a trabajar en la planta de extracción PESL del CEPIIS.*

<b>LISTADO DE SUSTANCIAS A TRABAJAR EN EL CEPIIS</b>		
<b>Unidad / Centro</b>	<b>Sustancias / Compuestos</b>	<b>Notas</b>
Planta de extracción sólido líquido y líquido – líquido	Aceites esenciales, Solventes orgánicos (alifáticos, aminas, hidrocarburos, halogenados, alcoholes, acetaldehídos, cetonas y ésteres), ácido carbónico, ácido carboxílico, ácido acético, ácidos inorgánicos, sales orgánicas e inorgánicas, alquenos	El equipo permite realizar el proceso de extracción, concentración de extracto y la recuperación del solvente, construido en acero inoxidable 304. Puede ser utilizado por una gran variedad de aplicaciones de extracción con solventes.

**Nota.** La tabla representa las sustancias que se pueden utilizar en el extractor sólido – líquido y líquido - líquido. Tomado de: C. D. Ortiz Mejía, “Diseño del protocolo para el sistema de gestión integral de residuos peligrosos (Respel) en el centro de procesos e innovación para la industria sostenible de la fundación universidad de américa”, Bogotá D.C. Fundación Universidad de América, 2022. [PDF]. Disponible: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/9088/1/6162993-2022-2-IQ.pdf> [Último acceso: 21 noviembre 2022].

- **Planta de destilación continua**

La destilación aprovecha una de las propiedades físicas de las sustancias (la volatilidad) para purificar y separar mezclas multicomponentes, cuando este proceso se realiza en serie, se obtienen componentes de alta pureza de producto destilado que al incorporarse al proyecto del Centro de Procesos e Innovación para la Industria Sostenible permite que los estudiantes tengan un acercamiento práctico al proceso más utilizado en las diferentes industrias.

**Tabla 12.**

*Cuadro de sustancias a trabajar en la planta de destilación PDC3 - M del CEPIIS.*

<b>LISTADO DE SUSTANCIAS A TRABAJAR EN EL CEPIIS</b>		
<b>Unidad / Centro</b>	<b>Sustancias / Compuestos</b>	<b>Notas</b>
Planta de destilación continua (control manual)	Solventes orgánicos (alifáticos, aminas, hidrocarburos aromáticos, hidrocarburos halogenados, alcoholes, cetonas y ésteres), ácido carbónico, ácido acético, ácidos inorgánicos, aceites, alquenos	Utilizado para destilación de diversidad de mezclas ideales y no ideales, destilación tradicional, extractiva y azeotrópica

**Nota.** La tabla representa las sustancias que se pueden utilizar en la planta de destilación. Tomado de: C. D. Ortiz Mejía, “Diseño del protocolo para el sistema de gestión integral de residuos peligrosos (Respel) en el centro de procesos e innovación para la industria sostenible de la fundación universidad de américa”, Bogotá D.C. Fundación Universidad de América, 2022. [PDF]. Disponible: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/9088/1/6162993-2022-2-IQ.pdf> [Último acceso: 21 noviembre 2022].

- **Planta de absorción de gases**

La absorción puede ser un proceso físico o químico que consiste en eliminar una o más compuestos de una corriente gaseosa al hacerse pasar a través de una corriente líquida. El proceso químico consiste en seleccionar un solvente que reaccione con el gas mientras que en el físico el gas debe tener mayor solubilidad en el solvente.

**Tabla 13.**

*Cuadro de sustancias a trabajar en la Planta de absorción PAG - M del CEPIIS.*

<b>LISTADO DE SUSTANCIAS A TRABAJAR EN EL CEPIIS</b>		
<b>Unidad / Centro</b>	<b>Sustancias / Compuestos</b>	<b>Notas</b>
Planta de absorción de gases	Partículas sólidas, aceites lubricantes, purgas de agua, etanol, benceno, solventes orgánicos tipo (MDEA, DEA, DGA, DIPA, TEA...), Organosulfurados, Butadieno, Aminas en general, ácido fosfórico.	Estructura modular construida en acero

**Nota.** La tabla representa las sustancias que se pueden utilizar en la planta de absorción. Tomado de: C. D. Ortiz Mejía, “Diseño del protocolo para el sistema de gestión integral de residuos peligrosos (Respel) en el centro de procesos e innovación para la industria sostenible de la fundación universidad de américa”, Bogotá D.C. Fundación Universidad de América, 2022. [PDF]. Disponible: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/9088/1/6162993-2022-2-IQ.pdf> [Último acceso: 21 noviembre 2022].

### 3.6. Etiquetas

Formatos de las etiquetas establecidas por la coordinación de laboratorios de la Universidad. Con las correspondientes alternativas que se pueden llegar a presentar en mezclas, éstas etiquetas abarcan todos los posibles escenarios de peligrosidad de residuos peligrosos, lo que lleva a llevar un seguimiento más detallado de qué sustancias se generan en el CEPIIS [20].

Estas etiquetas se pueden encontrar en el anexo 3.

## 4. MANUALES DE REFERENCIA

Este capítulo se enfoca en la recolección de manuales y guías de operación, de equipos de separación, que puedan tener una aplicación potencial. El objetivo es encontrar ítems en estos manuales y guías de operación, que puedan constituir la estructura sobre la cual se van a realizar los manuales de operación de los equipos de CEPURE.

Principalmente se busca encontrar información que pueda fortalecer la contextura del manual de operación, para así poder conformar el esqueleto, del manual base. Que será la referencia para realizar los manuales de operación de los equipos. También se menciona el contenido de los diagramas de proceso de los equipos.

### 4.1. Manuales de referencia

A continuación, se resaltan aspectos de los diferentes manuales y guías asociados al presente proyecto, como los puntos importantes que merecen estar en la estructura final del manual de operaciones que se plantea realizar.

#### Figura 47.

*Cuadro comparativo de los manuales de referencia con su respectivo aspecto de interés*

<b>TITULO</b>	<b>Equipo</b>	<b>Aspecto de interés</b>
Columna de absorción de gases - manual del usuario. [26]	Columna de absorción	<ul style="list-style-type: none"><li>• Seguridad: El aspecto de seguridad mostrado en el manual de usuario para una columna de absorción gases, encontramos unas advertencias previas a la operación que, son pertinentes a ser nombradas.</li><li>• Descripción del equipo: Este manual de usuario para una columna de absorción gases, describe de manera sencilla y</li></ul>

		<p>especifica, las partes del equipo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estrategia de control: Se muestra la instrumentación y los lazos de control del equipo de forma sencilla y directa.</li> </ul>
<p>Manual de operaciones unitarias de la universidad Rafael Landívar [27]</p>	<p>Equipo de destilación</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En el manual de operaciones unitarias de la universidad Rafael Landívar encontramos una explicación muy directa y específica, de la puesta en marcha y la parada del equipo. La cual se plantea utilizar como referencia para las operaciones de nuestro manual</li> <li>• Estilo de presentación, de los pasos de operación del equipo.</li> <li>• Con la descripción de las válvulas y equipos.</li> </ul>
<p>Rediseño y experimentación de un reactor discontinuo didáctico del laboratorio de operaciones unitarias, para la obtención de cristales de fosfato trisódico” - anexo 3 – manual de operaciones [28]</p>	<p>Reactor discontinuo</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se vio como utilizaron avisos de seguridad, que nos dan a entender aspectos importantes a la hora de tomar el manual</li> <li>• También vimos una tabla de componentes para organizar la información del equipo.</li> </ul>
<p>Laboratorio de operaciones unitarias guía práctica para destilación batch – Universidad Nacional</p>	<p>Torre de destilación Batch</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En esta guía, hacen una descripción, de parámetros de iniciación del equipo que se</li> </ul>

de Colombia [29]		deben hacer antes de la puesta en marcha.
Equipo para estudio de extracción sólido – líquido – manual de operaciones [30]	Extractor sólido – líquido	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muestran los requerimientos de servicios que son necesarios para la operación del equipo.</li> </ul>
Generalidades y aplicaciones del equipo absorción de gases gunt – universidad ean [31]	Equipo de absorción de gases	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enseñan una tabla en donde recopilan aspectos técnicos del equipo, que permite entender esta información de una manera más rápida y concreta</li> <li>• También dan explicación de las indicaciones de seguridad, que se deben tener antes de la operación del equipo.</li> <li>• Muestran el esquema general del equipo, que sirve como referencia para las operaciones del equipo.</li> </ul>
Manual de operación - equipo de pérdidas por fricción y control [32]	Equipo de pérdidas por fricción y control	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se encontraron diagramas de flujo de proceso, que nos ayudan a entender el paso a paso de cada uno de los procesos en el equipo de una manera más didáctica</li> </ul>
Planta de sólido líquido, Santiago de Cali: servicio nacional de aprendizaje - Sena, 2005. [33]	Planta sólido – líquido – SENA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuenta con una descripción general del equipo a modo de introducción del proceso, los equipos y algunas prácticas.</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un apartado en donde explican los usos y finalidad de la planta .</li> <li>• Descripción de la instrumentación que se presentan en una tabla de forma organizada.</li> <li>• Descripción de las variables de proceso, que se controlan durante el funcionamiento del equipo</li> </ul>
--	--	---

**Nota.** La tabla representa los manuales que se tomaron como referencia para la estructura de los manuales de CEPURE.

## 4.2. Diagramas de procesos

- Diagrama BFD de los equipos:

El diagrama de bloques de los equipos, debe describir los procesos principales de operación, las entradas y salidas del proceso.

- Diagrama PFD de los equipos:

El diagrama de flujo de proceso debe describir, las corrientes, la nomenclatura de los equipos principales y auxiliares de operación, los principios de operación de cada equipo.

- Diagrama P&D de los equipos

El diagrama de instrumentación y control debe describir, los equipos con su instrumentación de control, como sensores, válvulas, etc.

- Diagramas de flujo ecológico:

Debido a que no se tiene claro que tipos de prácticas se realizarán en el equipo se pondrán los 12 criterios de la química verde y su caracterización de color para poder evaluar los criterios.



### 4.3. Estructura para los manuales de CEPURE

#### 4.3.1. Estructura del manual de operaciones

**Portada:** Pagina de presentación del manual de operaciones.

**Prologo:** Descripción del manual a forma de introducción.

**Descripción de CEPIIS:** Breve descripción del equipo encargado de la planta piloto.

**CEPURE:** Descripción del área encargada de los equipos dentro de CEPIIS.

**Objetivos:** Presentación de los objetivos del manual.

**Índice:** Presentación del contenido del manual.

1. **Seguridad:** Encontramos los aspectos de seguridad y control de riegos en el equipo.
  - 1.1. **Dotación:** Equipo de seguridad personal para manejar el equipo.
  - 1.2. **Área de trabajo:** Requisitos de espacio para operar el equipo.
  - 1.3. **Peligros:** Principales riesgos a la hora de operar el equipo.
  - 1.4. **What if:** Análisis de posibles riesgos durante la operación del equipo.
  - 1.5. **Recomendaciones:** Recomendaciones de seguridad para la operación del equipo.
2. **Equipo:** Capítulo dedicado a la descripción y explicación de cada una de las partes del equipo.
  - 2.1. **Descripción:** Descripción de las partes del equipo.
  - 2.2. **Especificaciones técnicas:** características de cada equipo.
    - 2.2.1. **Instrumentación:** el conjunto de ciencias y tecnologías mediante las cuales se miden cantidades físicas o químicas con el objeto de obtener información para su archivo, evaluación o actuación sobre los Sistemas de Control Automático.
    - 2.2.2. **Tabla de parámetros y variables de operación por equipo:** información sobre la operación en la aparición en la que el trabajo en ejecución está planificado.
  - 2.3. **Tablero de control:** Descripción de los componentes del tablero de control.
  - 2.4. **Diagramas por operación del equipo:**
    - 2.4.1. **BFD:** Diagrama de bloques del proceso.

- 2.4.2. PFD: Diagrama de flujo de equipos del proceso.
- 2.4.3. P&D: Diagrama de instrumentación del equipo.
- 3. **Operación:** Se describen las operaciones para realizar prácticas en el equipo.
  - 3.1. **Diagrama de flujo:** Diagrama del proceso de operación del equipo.
  - 3.2. **Preparación del equipo:** Pasos previos a revisar antes de operar el equipo.
  - 3.3. **Puesta en marcha:** Pasos para iniciar la operación del equipo.
  - 3.4. **Procesos:** descripción de los procesos de operación del equipo.
  - 3.5. **Parada:** pasos para detener el funcionamiento del equipo.
- 4. **Mantenimiento:** Descripción de procesos de limpieza y conservación del equipo.
- 5. **Respel:** sustancias que se manejan en el equipo y sus respectivas etiquetas para los residuos.
- 6. **Análisis de riesgo:** Hazop y bow-tie del equipo.
- 7. **Referencias:** citas de material para estudio del equipo adicional.
- 8. **Anexo:** Hoja de compatibilidad química del equipo.

Los manuales de operación de los equipos se encuentran en el anexo 4.

## 5. CONCLUSIONES

Se identificaron los parámetros y variables que operan en cada equipo, a partir de una investigación teórica de cada equipo, recolección de información de trabajos anteriores en aspectos de seguridad, en donde se identificaron las metodologías what if, Hazop y Bow-tie de los equipos.

A partir de la información del proveedor, describo los elementos que componen a los equipos, los diagramas de procesos BFD, PFD y P&D, para cada uno de los modos de operación, tablas de parámetros y variables por equipo. También se integran los What if, Hazop, Bow-tie y etiquetas de seguridad que dan una información mas específica de los procesos que se realizan en los equipos. Se realizó la inclusión de la metodología de “El diagrama de flujo como semáforo de seguridad ecológica de los experimentos de laboratorio” para el desarrollo de los diagramas de flujo de los equipos.

A través de la revisión de guías y manuales operativos, que sirvieron como antecedentes para recolectar ítems importantes, se realizó una tabla con cada aspecto importante encontrado, .también se añaden la descripción de lo que se encuentra en los diagramas BFD, PFD y P&D de cada equipo. También se añaden los 12 criterios de la química verde y su escala de color. Para permitir evaluar las prácticas que se realizaran en los equipos.

Este trabajo, creo la estructura de los manuales de operación, que añade los diagramas de operación tabla de especificaciones, tabla de parámetros y diagramas de flujo, para cada modo de operación que se encuentra en los equipos pertenecientes a CEPURE.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. V. Gómez, “Una Planta Piloto para la docencia e investigación”, 19 11 2014. [En línea]. <https://unab.edu.co/una-planta-piloto-para-la-docencia-e-investigacion/>. [Último acceso: 09 octubre 2022].
- [2] N. R. Togra pacheco, “Diseño de un manual de procesos para la empresa industrial, mecánica de precisión lema del pacifico, meprelpa s.a.”, Cuenca – Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana, 2015. [PDF]. Disponible: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7718/1/UPS-CT004581.pdf>. [Último acceso: 20 noviembre 2022].
- [3] R. E. Treybal, *Operaciones de transferencia de masa*, 2ª. Ed., México: McGRAW-HILL , 2000.
- [4] G. Fernández, 28/05/2012 “Química Orgánica, secado”. [En línea]. Disponible: <https://www.quimicaorganica.net/secado.html#:~:text=Importancia%20del%20secado,la%20cristalización%20de%20muchas%20sustancias>. [Último acceso: 20 noviembre 2022].
- [5] R. Ruiz Sepa, “Diseño de un secador de bandejas para la deshidratación de plátano en la parroquia Veracruz del cantón Pastaza”, Riobamba - Ecuador: Escuela superior politécnica de Chimborazo, 2016. [PDF]. Disponible: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/5677/1/96T00337.pdf>. [Último acceso: 20 noviembre 2022].
- [6] M. D. S. García Valverde, “Diseño de un secador de bandejas para el secado de maíz, quinua y amaranto en la hacienda san Jorge”, Riobamba – Ecuador: Escuela superior politécnica de Chimborazo, 2013. [PDF]. Disponible: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4850/3/96T00332.PDF>. [Último acceso: 20 noviembre 2022].
- [7] A. D. P. Cárdenas Gómez , “Construcción y puesta en marcha de un secador de bandejas directo para la obtención de curvas de secado”, Bogotá : Universidad de los Andes, 2005. [PDF]. Disponible: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/22170/u262181.pdf?sequence>. [Último acceso: 20 noviembre 2022].
- [8] C. J. Geankoplis, *Procesos de transporte y principios de procesos de separación (incluye operaciones unitarias)*, 4ª. Ed. México: Compañía editorial continental, 2006.
- [9] J. C. Palacios Manrique y R. Sánchez Vilca, “Diseño, construcción y evaluación de parámetros de operación de un equipo de extracción sólido - líquido para el laboratorio de procesos unitarios de la facultad de ingeniería química de la universidad Nacional del centro del Perú”, Huancayo- Perú: Universidad Nacional del centro del Perú, 2008. [PDF]. Disponible: [https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/217/T-08\\_13.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/217/T-08_13.pdf?sequence=1&isAllowed=y) [Último acceso: 20 noviembre 2022].
- [10] G. Hamburg, “Equipment for Engineering Education”, [En línea]. Disponible: [https://www.gunt.de/images/download/extraction\\_spanish.pdf](https://www.gunt.de/images/download/extraction_spanish.pdf). [Último acceso: 20 noviembre 2022].
- [11] W. L. McCabe, J. C. Smith y P. Harriot, *Operaciones unitarias en ingeniería química séptima edición*, México: McGraw-Hill Interamericana, 2007.
- [12] A. Marcilla Gomis, *Introducción a las operaciones de separación cálculo por etapas de equilibrio*, Alicante: Publicaciones Universidad de Alicante, 1998.

- [13] D. D. D. P. Systems, “Extracción líquido/líquido”, [En línea]. Disponible: <https://www.dedietrich.com/es/soluciones-y-productos/extraccion/extraccion-liquido/liquido> [Último acceso: 20 noviembre 2022].
- [14] J. J. Alvarado Corella, “Diseño de una columna de absorción para la neutralización del gas clorpirifos etil en la producción de películas plásticas para fundas de banano en planta 2 de la empresa yanber S.A.”, San José - Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2013. [PDF]. Disponible: [https://www.researchgate.net/publication/263618221\\_Diseño\\_de\\_una\\_Columna\\_de\\_Absorción\\_para\\_la\\_neutralización\\_del\\_gas\\_Clorpirifos\\_Etil\\_en\\_la\\_producción\\_de\\_películas\\_plásticas\\_para\\_fundas\\_de\\_banano\\_en\\_Planta\\_2\\_de\\_la\\_empresa\\_Yanber\\_SA](https://www.researchgate.net/publication/263618221_Diseño_de_una_Columna_de_Absorción_para_la_neutralización_del_gas_Clorpirifos_Etil_en_la_producción_de_películas_plásticas_para_fundas_de_banano_en_Planta_2_de_la_empresa_Yanber_SA) [Último acceso: 20 noviembre 2022].
- [15] G. Hamburt, “Ingeniería de procesos térmicos Absorción y adsorción”, [En línea]. Disponible: [https://www.gunt.de/images/download/absorption\\_spanish.pdf](https://www.gunt.de/images/download/absorption_spanish.pdf). [Último acceso: 21 noviembre 2022].
- [16] G. Hamburg, “Ingeniería de procesos térmicos Destilación/rectificación”, [En línea]. Disponible: [https://www.gunt.de/images/download/distillation\\_rectification\\_spanish.pdf](https://www.gunt.de/images/download/distillation_rectification_spanish.pdf). [Último acceso: 21 noviembre 2022].
- [17] P. C. Wankat, Ingeniería de procesos de separación., 2ª. Ed. México: Pearson Education Inc., 2009.
- [18] A. M. Mistretta, “Diseño de una columna de destilación para recuperación de una sustancia termosensible”, Valparaíso - Brasil: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2012. [PDF]. Disponible: [http://opac.pucv.cl/pucv\\_txt/txt-3000/UCF3374\\_01.pdf](http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-3000/UCF3374_01.pdf) [Último acceso: 21 noviembre 2022].
- [19] M. S. Vargas Jiménez y M. Espitia Velandia, “Propuesta de un plan de gestión de riesgo en el centro de procesos e innovación para la industria sostenible (CEPIIS) de la Universidad de América utilizando las herramientas de análisis de riesgo what if, hazop y la metodología bow-tie”, Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América, 2022. [PDF]. Disponible: <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/9033> [Último acceso: 21 noviembre 2022].
- [20] C. D. Ortiz Mejía, “Diseño del protocolo para el sistema de gestión integral de residuos peligrosos (Respel) en el centro de procesos e innovación para la industria sostenible de la fundación universidad de américa”, Bogotá D.C. Fundación Universidad de América, 2022. [PDF]. Disponible: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/9088/1/6162993-2022-2-IQ.pdf> [Último acceso: 21 noviembre 2022].
- [21] “Manual de operación secador de bandejas”, PSE, 2018.
- [22] “Manual de operación planta de extracción sólido-líquido y líquido-líquido”, PSE, 2018.
- [23] “Manual de operación planta de absorción”, PSE, 2018.
- [24] “Manual de operación Planta de destilación continua”, PSE, 2018.
- [25] Y. M. Vargas-Rodríguez, A. Obaya Valdivia, S. Lima Vargas, A. Hernández Escamilla, R. Miranda Ruvalcaba y G. . I. Vargas Rodríguez, “El diagrama de flujo como semáforo de

- seguridad”, México, D.F., México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2015. [PDF]. Disponible: <https://revistas.unam.mx/index.php/req/article/view/63350/55610> [Último acceso: 24 enero 2023].
- [26] “Manual del usuario Columna de absorción de gases”, Intecmo 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-tecnologica-del-peru/operaciones-unitarias/torre-de-absorcion-manual-de-operacion-y-mantenimiento/26030361> [Último acceso: 21 noviembre 2022].
- [27] M. Santizo, “Manual operaciones unitarias - prácticas de laboratorio de operaciones unitarias II”, Universidad Rafael Landívar. [PDF]. Disponible: [http://recursosbiblio.url.edu.gt/publicjlg/biblio\\_sin\\_paredes/fac\\_ing/Quimica/Curso/Lab\\_Oper/05.pdf](http://recursosbiblio.url.edu.gt/publicjlg/biblio_sin_paredes/fac_ing/Quimica/Curso/Lab_Oper/05.pdf) [Último acceso: 21 noviembre 2022].
- [28] A. L. Mosquera Solís y R. A. Muñoz Vélez , “Rediseño y experimentación de un reactor discontinuo didáctico del laboratorio de operaciones unitarias, para la obtención de cristales de fosfato trisódico”, Guayaquil: Universidad de Guayaquil, 2017. [PDF]. Disponible: <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/22459/1/401-1281%20-%20Rediseñ%20experimentac%20reactor%20discontinuo%20didactico.pdf> [Último acceso: 21 noviembre 2022].
- [29] “Laboratorio de operaciones unitarias - guía práctica para destilación Batch”, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 1999. [PDF]. Disponible: <https://ingenieria.bogota.unal.edu.co/es/extension/laboratorios/labs-partamentos/laboratorios-ingenieria-quimica-y-ambiental/documentos/category/412-equipos.html> [Último acceso: 21 noviembre 2022].
- [30] “Equipo para estudio de extracción solido-liquido/ liquido-liquido manual de operaciones y prácticas”. Generatoris. S.A. [PDF]. Disponible: [https://energia.azc.uam.mx/images/PDF/Manuales/Equipo\\_para\\_estudio\\_de\\_Extracción\\_Sólido-Líquido\\_Líquido-Líquido\\_Parte1.pdf](https://energia.azc.uam.mx/images/PDF/Manuales/Equipo_para_estudio_de_Extracción_Sólido-Líquido_Líquido-Líquido_Parte1.pdf) [Último acceso: 21 noviembre 2022].
- [31] K. M. Ruíz, C. A. Castillo Acosta y E. Ramírez Valencia, “Generalidades y aplicaciones del equipo absorción de gases GUNT”, Bogotá: Universidad EAN, 2018. [PDF]. Disponible: <https://editorial.universidadean.edu.co/media/acceso-abierto/generalidades-y-aplicaciones-del-equipo-de-absorcion-de-gases-gunt-ean.pdf> [Último acceso: 21 noviembre 2022].
- [32] “Manual de operación equipo de pérdidas por fricción y control”, Universidad Nacional de Colombia. [PDF]. Disponible: <https://ingenieria.bogota.unal.edu.co/es/extension/laboratorios/labs-partamentos/laboratorios-ingenieria-quimica-y-ambiental/documentos/category/412-equipos.html> [Último acceso: 21 noviembre 2022].
- [33] “Manual PSL 200 Extracción Solido Liquido”, Santiago de Cali: Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA, 2005. [En línea]. Disponible: <https://es.scribd.com/document/392584825/Manual-Psl-200-Extraccion-Solido-Liquido> [Último acceso: 21 noviembre 2022].

## **ANEXOS**

## ANEXO 1

### WHAT IF Y HAZOP DE LOS EQUIPOS DE CEPURE

What if y hazop, de los equipos del centro de procesos y refinación (CEPURE). El documento se encuentra disponible en Google drive y se puede acceder a él por medio del vínculo adjunto o el código QR que se muestra a continuación.



Al escanear el código QR se tendrá acceso al what if y hazop, de los equipos del centro de purificación y refinación. También esta disponible en el siguiente enlace.

[https://docs.google.com/spreadsheets/d/1Pxzv4P7vqz7GKjbfMiZg5FD4zY-Dfbrw/edit?usp=share\\_link&ouid=112959616699469696381&rtpof=true&sd=true](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1Pxzv4P7vqz7GKjbfMiZg5FD4zY-Dfbrw/edit?usp=share_link&ouid=112959616699469696381&rtpof=true&sd=true)



## ANEXO 2

### METODOLOGIA BOW-TIE DE LOS EQUIPOS DE CEPURE

Metodología Bow-tie de los equipos del centro de purificación y refinación. El documento se encuentra disponible en Google drive y se puede acceder a él por medio del vínculo adjunto o el código QR que se muestra a continuación.



Al escanear el código QR se tendrá acceso a la metodología Bow-tie de los equipos del centro de purificación y refinación. También está disponible en el siguiente enlace.

[https://drive.google.com/file/d/1Msd6YqEH\\_9UwJzZZ6tGAKjfDORBb7hfF/view?usp=share\\_link](https://drive.google.com/file/d/1Msd6YqEH_9UwJzZZ6tGAKjfDORBb7hfF/view?usp=share_link)

### ANEXO 3

## ETIQUETAS PARA LOS EQUIPOS DE CEPURE

Etiquetas de RESPEL de la Fundación Universidad de América. El documento se encuentra disponible en Google drive y se puede acceder a él por medio del vínculo adjunto o el código QR que se muestra a continuación.



Al escanear el código QR se tendrá acceso a las etiquetas de RESPEL de la Fundación universidad de América. También está disponible en el siguiente enlace.

[https://drive.google.com/file/d/1zmaAVmi4eTjKg1\\_6a5ejVmQijxi11hT4/view?usp=share\\_link](https://drive.google.com/file/d/1zmaAVmi4eTjKg1_6a5ejVmQijxi11hT4/view?usp=share_link)

## ANEXO 4

### MANUALES DE OPERACIÓN DE LOS EQUIPOS DE CEPURE

A continuación, se encuentran los manuales de operación de los equipos del centro de purificación y refinación. Los manuales se encuentran disponibles en una carpeta en Google drive y se puede acceder a él por medio del vínculo adjunto o el código QR que se muestra a continuación.



Al escanear el código QR se tendrá acceso a las etiquetas de RESPEL de la Fundación universidad de América. También está disponible en el siguiente enlace.

[https://drive.google.com/drive/folders/1b-DUp9CzuqYZXMFkG0imGJN2Uak-xY1n?usp=share\\_link](https://drive.google.com/drive/folders/1b-DUp9CzuqYZXMFkG0imGJN2Uak-xY1n?usp=share_link)

## **ANEXO 5**

### **RECOMENDACIONES-PROYECCIÓN A FUTURO DE LOS EQUIPOS DE CEPURE**

Se recomienda actualizar la información de los manuales de operación, después de la puesta en marcha de los equipos, debido a que por retrasos en la construcción de CEPIIS, no se pudo comprobar la operación de los equipos.

Realizar el etiquetado de los equipos con su correspondiente nomenclatura, el etiquetado de las válvulas y de la instrumentación, para que coincida con los diagramas de procesos, en caso de efectuarse un cambio en los nombres, actualizar los diagramas de operación.

Se recomienda realizar la caracterización de la información de los equipos que se sugiere en el capítulo 2 del documento para cada equipo, con el fin de tener la información de los parámetros, variables y rangos de operación de todos los equipos.

Se recomienda realizar la validación de las características de los equipos, la calibración de los sensores después de la instalación de los equipos y realizar los ajustes a los manuales de acuerdo a los hallazgos encontrados.

Se recomienda, delimitar las zonas de seguridad, durante la operación del equipo para evitar accidentes, como no estaban instalados los equipos no se pudo realizar esta sugerencia en los manuales.

Se recomienda realizar un plan de predicción y mantenimiento de los equipos, para prevenir futuras fallas en los sistemas de operación y garantizar tanto el bienestar del equipo como la seguridad de los que lo operaran.

Se recomienda hacer un seguimiento al trabajo donde se desarrolló la propuesta de un plan de gestión de riesgo en el centro de procesos e innovación para la industria sostenible (CEPIIS) de la universidad de américa utilizando las herramientas de análisis de riesgo what if, hazop y la metodología bow-tie. en donde se sugiere la implementación de unos instrumentos de control y seguridad para los equipos.

Para culminar este trabajo, se invita a estar actualizando constantemente la información desarrollada en los manuales de operación, que permita tener un manual con la información más última posible, garantizando el buen manejo y operación de los equipos de CEPURE.