

DESARROLLO DE UN PLAN OPERATIVO, CONSIDERANDO PARÁMETROS DE
SEGURIDAD INDUSTRIAL, PARA LA PUESTA EN MARCHA Y VALIDACIÓN DE LOS
EQUIPOS A ESCALA PILOTO, PRESENTES EN EL CENTRO DE PURIFICACIÓN Y
REFINACIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

JUDHY PAULINE SAENZ VIZCAYA

CATALINA SOFIA LAGOS ACOSTA

Proyecto integral para optar por el título de

INGENIERO QUÍMICO

Director

MEng Luis Alberto Figueroa Casallas

INGENIERO QUÍMICO

Co – director

PDI. Juan Camilo Cely Garzón

INGENIERO QUÍMICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA INGENIERÍA QUÍMICA

BOGOTÁ D.C.

2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

Ing.

Ing.

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

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano Facultad de Ingenierías

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Director Programa Ingeniería Química

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Fundación 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

El presente trabajo se lo dedico inicialmente a Dios, por darme la inspiración y la fuerza para continuar en este proceso para obtener uno de los anhelos más deseados.

A mis padres Augusto Sáenz y Diana Vizcaya, por su infinito amor, sacrificio y trabajo en todos estos años, gracias a ellos he llegado hasta aquí y he logrado convertirme en lo que soy hoy en día. Ha sido un orgullo y un privilegio ser su hija, son los mejores padres.

A mi hermano por estar siempre presente, acompañándome y por el apoyo moral, que me ha brindado a lo largo de esta etapa de mi vida.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

- Judhy Pauline Sáenz Vizcaya

La presente investigación la dedico a mis padres, Nelly Acosta y Francisco Lagos por su compañía, apoyo e infinito amor en toda mi carrera universitaria, porque gracias a ellos he conseguido lo que hoy tengo y jamás podré pagarles lo que por mí han hecho y en quien me han convertido.

A Dios por acompañarme y forjar un camino lleno de conocimiento y aprendizaje fructífero para mí como persona y como profesional.

A todos mis amigos/as y compañeros/as que estuvieron ahí cuando más los necesite, llenos de buenos energías y por hacer de la universidad una experiencia llena de recuerdos y memorias maravillosas.

- Catalina Sofia Lagos Acosta

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo agradezco a Dios por ser mi guía y acompañarme en el transcurso de mi vida, brindándome paciencia y sabiduría para culminar con éxito mis metas propuestas.

A mis padres por ser mi pilar fundamental y haberme apoyado incondicionalmente, pese a las adversidades e inconvenientes que se presentaron ya que con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más. Gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía

Agradezco a los todos docentes que, con su sabiduría, conocimiento y apoyo, motivaron a desarrollarme como persona y profesional en la Fundación Universidad de América.

Finalmente quiero agradecerles a mis amigos y a mi novio por su apoyo moral, el cual permitió con empeño, dedicación y cariño, y a todos quienes contribuyeron con un granito de arena para culminar con éxito la meta propuesta.

- Judhy Pauline Sáenz Vizcaya

Le agradezco especialmente a mis padres, a Miguel Ovalle y Angela Sánchez, por ser mi familia, mi apoyo y mi compañía por tantos años, gracias a su esfuerzo y su amor soy la profesional que soy hoy.

A la Universidad de América por darme una experiencia universitaria inolvidable, en términos académicos, profesionales y personales. A los docentes que me transmitieron su conocimiento y su inmensa dedicación y pasión por la carrera.

Infinitas gracias a cada persona que hizo posible la realización de este proyecto, la dedicación y esmero que brindaron para hacer de la Universidad un lugar cada vez mejor.

- Catalina Sofia Lagos Acosta

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	16
INTRODUCCIÓN	18
OBJETIVOS	19
1. GENERALIDADES DE LA EMPRESA	20
1.1. Planta piloto	20
1.2. Centro de purificación y refinación	20
2. MARCO TEÓRICO	22
2.1. Conceptos generales	22
2.2. Procesos de separación	23
2.3. Proceso de destilación	23
2.4. Procesos de absorción	27
2.5. Límites operativos de las unidades de destilación y absorción por material de fabricación	29
2.6. Tipos de operación de destilación	34
2.7. Tipos de operación de absorción	35
2.8. Posibles fallos en la unidad de destilación	37
2.9. Posibles fallos en la unidad de absorción	44
2.10. Proceso de puesta en marcha	49
3. DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES DEL CEPURE	52
3.1. Descripción de la unidad de destilación continua	52
3.2. Descripción de la unidad de absorción de gases	55

4. PARÁMETROS OPERACIONALES Y DE SEGURIDAD DE LAS UNIDADES DE PROCESO	62
4.1. Parámetros operativos de la unidad de destilación continua	62
4.2. Parámetros de seguridad de la unidad de destilación continua	63
4.3. Parámetros operativos de la unidad de absorción de gases	64
4.4. Parámetros de seguridad de la unidad de absorción de gases	65
4.5. Plan operativo y de seguridad en términos de proyección de uso	67
5. EVALUACIÓN OPERATIVA Y ESTRUCTURAL DE LAS UNIDADES EN EL PROCESO DE INSTALACIÓN	72
6. VALIDACIÓN DE LOS EQUIPOS	81
6.1. Validación de la unidad de destilación continua	81
6.2. Validación de la unidad de absorción de gases	82
6.3. Simulación en nivel de ingeniería conceptual	84
7. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DE VALIDACIÓN	109
7.1. Análisis de la información de validación de la unidad de destilación continua	110
7.1.1. <i>Destilación normal</i>	110
7.1.2. <i>Destilación extractiva</i>	112
7.1.3. <i>Destilación azeotrópica</i>	113
7.2. Análisis de la información de validación de la unidad de absorción de gases	115
7.2.1. <i>Absorción física</i>	115
7.3. Análisis de sensibilidad	119
7.3.1. <i>Análisis de sensibilidad correspondiente a destilación normal</i>	119
7.3.2. <i>Análisis de sensibilidad correspondiente a destilación extractiva</i>	121

<i>7.3.3. Análisis de sensibilidad correspondiente a destilación azeotrópica</i>	125
<i>7.3.4. Análisis de sensibilidad correspondiente a absorción física I</i>	129
<i>7.3.5. Análisis de sensibilidad correspondiente al segundo experimento de absorción física</i>	133
8. CONCLUSIONES	137
BIBLIOGRAFÍA	140
ANEXOS	143

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. Render del Centro de Procesos e Innovación para la Industria Sostenible (CEPIIS)	21
Figura 2. Proceso de destilación y sus componentes	24
Figura 3. Esquema de la destilación azeotrópica	25
Figura 4. Esquema de la destilación extractiva	26
Figura 5. Esquema de la destilación convencional o simple	27
Figura 6. Proceso de absorción en columna de platos y columna empacada	28
Figura 7. Diagrama planta de destilación continua	52
Figura 8. Render de la unidad de destilación continua	55
Figura 9. Diagrama de la unidad de absorción de gases	56
Figura 10. Render de la unidad de absorción de gases	60
Figura 11. Unidad de absorción de gases	61
Figura 12 Camión grúa.	72
Figura 13. Grúa tipo cangrejo	73
Figura 14. Izaje y transporte de la unidad de destilación.	74
Figura 15. Izaje y transporte de la unidad de absorción de gases.	75
Figura 16. Estructura de la unidad de destilación continua.	76
Figura 17. Daño en la estructura de la unidad de destilación continua.	77
Figura 18. Daño en la estructura de absorción de gases	77
Figura 19. Simulación correspondiente a la destilación normal	87
Figura 20. Simulación correspondiente a la destilación extractiva	92

Figura 21. Simulación correspondiente a destilación azeotrópica	96
Figura 22. Simulación correspondiente a absorción física	101
Figura 23. Segunda simulación correspondiente a absorción física	105
Figura 24. Fracción de separación de etanol y agua en la columna de destilación correspondiente a destilación normal	111
Figura 25. Fracción de separación de etanol, agua y etilenglicol en la columna de destilación correspondiente a destilación extractiva	112
Figura 26. Costos de los servicios auxiliares de la unidad de destilación continua correspondientes al experimento de destilación extractiva	113
Figura 27. Fracción de separación de ácido acético, agua y acetato de isobutilo en la columna de destilación correspondiente a destilación azeotrópica.	114
Figura 28. Costos de los servicios auxiliares de la unidad de destilación continua correspondientes al experimento de destilación azeotrópica	115
Figura 29. Fracción de dióxido de azufre, agua y aire en la columna de absorción correspondiente a absorción física	116
Figura 30. Costos de los servicios auxiliares de la unidad de absorción de gases correspondientes al experimento de absorción física	117
Figura 31. Fracción de amoníaco, agua y aire en la columna de absorción correspondiente a absorción física	118
Figura 32. Costos de los servicios auxiliares de la unidad de absorción de gases correspondientes al segundo experimento de absorción física	119
Figura 33. Tabla correspondiente al análisis de sensibilidad de la presión de trabajo de la bomba (P-101) correspondiente al primer experimento de absorción física.	131
Figura 34. Tabla correspondiente al análisis de sensibilidad de la presión de trabajo del compresor (C-101) correspondiente al primer experimento de absorción física.	132
Figura 35. Código QR del plan de puesta en marcha de las unidades de CEPURE	156
Figura 36. Código QR del plan de validación de la unidad de destilación continua de CEPURE	157

Figura 37. Código QR del plan de validación de la unidad de absorción de gases de CEPURE 158

Figura 38. Código QR de las recomendaciones para alargar la vida útil de las unidades de CEPURE. 159

LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Composición química del acero inoxidable 304	30
Tabla 2. Resistencia del teflón (PTFE) con respecto a grupos de sustancias químicas	32
Tabla 3. Resistencia del acero inoxidable 304 con respecto a grupos de sustancias químicas	33
Tabla 4. Tipos de experimentos en la unidad de destilación	34
Tabla 5. Tipos de operación a realizar en la unidad de absorción de gases	36
Tabla 6. Fenómenos que se pueden presentar en la columna de destilación.	38
Tabla 7. Posibles fallos en los equipos que componen la unidad de destilación continua	39
Tabla 8. Posibles fallas en la unidad de absorción de gases.	44
Tabla 9. Codificación por color de las válvulas presentes en la unidad de destilación continua	62
Tabla 10. Plan de puesta en marcha de los equipos presentes en las unidades de absorción y destilación	79
Tabla 11. Especificaciones de operación de la unidad de destilación continúa dadas por el proveedor	86
Tabla 12. Resultados de la simulación correspondiente a la destilación normal	89
Tabla 13. Resultados de la simulación correspondiente a la destilación extractiva	93
Tabla 14. Resultados de la simulación correspondiente a destilación azeotrópica	96
Tabla 15. Especificaciones de operación de la unidad de absorción dadas por el proveedor	99
Tabla 16. Resultados de la simulación correspondiente a absorción física	102
Tabla 17. Resultados de la segunda simulación correspondiente a absorción física	107
Tabla 18. Análisis de sensibilidad de la etapa de alimentación correspondiente al experimento de destilación normal.	120

Tabla 19. Análisis de sensibilidad de la etapa de alimentación correspondiente al experimento de destilación extractiva.	122
Tabla 20. Análisis de sensibilidad de la razón de reflujo correspondiente al experimento de destilación extractiva	123
Tabla 21. Análisis de sensibilidad de la presión de operación de la columna de destilación correspondiente al experimento de destilación extractiva.	124
Tabla 22. Análisis de sensibilidad de la etapa de alimentación correspondiente al experimento de destilación azeotrópica.	126
Tabla 23. Análisis de sensibilidad de la razón de reflujo correspondiente al experimento de destilación azeotrópica	127
Tabla 24. Análisis de sensibilidad de la presión de operación de la columna de destilación correspondiente al experimento de destilación extractiva.	127
Tabla 25. Análisis de sensibilidad de la presión de trabajo de la columna de absorción correspondiente al primer experimento de absorción física.	129
Tabla 26. Análisis de sensibilidad de la presión de trabajo de la columna de absorción correspondiente al primer experimento de absorción física.	134
Tabla 27. Tabla correspondiente al análisis de sensibilidad de la presión de trabajo de la bomba (P-101) correspondiente al segundo experimento de absorción física.	135
Tabla 28. Resultados simulación destilación normal	144
Tabla 29. Resultados simulación destilación extractiva	146
Tabla 30. Resultados simulación destilación azeotrópica.	148
Tabla 31. Resultados de la simulación de absorción física	151
Tabla 32. Resultados de la segunda simulación de absorción física	154
Tabla 33. Formato de registro para el manejo de los equipos presentes en la unidad de destilación continua.	160
Tabla 34. Formato de registro para el manejo de los equipos presentes en la unidad de absorción de gases.	164

Tabla 35. Formato de plan operativo para la puesta en marcha de los equipos a escala piloto de CEPURE	168
Tabla 36. Formato de plan operativo para la validación de la unidad de destilación continua	175
Tabla 37. Formato plan operativo para la validación de la unidad de absorción de gases	183

RESUMEN

Este proyecto se realiza con el fin de plantear un plan operativo y de seguridad para el Centro de Purificación y Refinación (CEPURE) del Centro de Procesos para la Industria Sostenible (CEPIIS) de la Universidad de América evaluando a partir de los posibles problemas que se pueden generar durante los procesos de instalación, izaje y ensamble de las unidades que corresponden a CEPURE. Con el fin de identificar los posibles contratiempos que se pueden presentar, e igualmente prevenir la ocurrencia de estos eventos generando un sistema de respuesta acorde a la situación que se presente. Con el objetivo de realizar la puesta en marcha y la validación de los equipos de forma planificada, teniendo en cuenta las particularidades y las precauciones puntuales que se deben tener sobre cada una de las unidades y, de esta manera garantizar un correcto desempeño y funcionamiento, tanto a nivel estructural como interno de las mismas.

Con base en esto se plantea un marco referencial con respecto a las unidades de destilación continua y absorción de gases, los límites operativos de cada una de ellas haciendo énfasis en el material de construcción y las posibles sustancias que se pueden usar en los procesos de validación, puesta en marcha y en su uso a largo plazo como herramientas enfocadas a la educación. De igual manera se establecen las posibles operaciones que se pueden llevar a cabo en cada una de las unidades y los posibles fallos que se pueden desatar teniendo en cuenta los lazos de control que constituyen a las mismas.

En primera instancia se realiza una descripción detallada de cada uno de los equipos que conforman las unidades de destilación y absorción, con el fin de analizar los componentes de cada una de ellas tales como válvulas, sensores y tuberías, además de evaluar aspectos tales como material de construcción, función a desarrollar y ubicación en planta. Estos parámetros son importantes para construir el plan operativo y de seguridad ya que pautan la ruta a seguir mediante los equipos especialmente delicados e indispensables para la operación.

Para continuar se realiza una evaluación a nivel operativo y estructural de todas las unidades que conforman las unidades de destilación continua y absorción de gases. La evaluación estructural se realiza previo a la instalación y posterior a esta, con el fin de analizar y justificar los posibles daños o percances que sufrieron las unidades en la etapa de instalación.

Como paso siguiente se realiza una validación con base en las variables criterio para cada una de las unidades incluyendo los equipos que las constituyen y las válvulas de control que posean. Esto se realiza con el fin de verificar por medio de una simulación que las variables y los criterios establecidos por parte del proveedor se pueden aplicar y replicar en las torres sin generar ningún problema y minimizando la ocurrencia de riesgo tanto en la validación como en la operación a largo plazo.

Por último, se analiza la información obtenida en las simulaciones de las unidades y de cada uno de los equipos que las conforman, con el objetivo de determinar los factores con mayor probabilidad de ocurrencia en la operación de las torres e identificar las medidas a tomar para extender la vida útil de los equipos disminuyendo los factores económicos teniendo en cuenta la seguridad de los estudiantes y profesores que harán uso de los equipos presentes en CEPURE con fines académicos.

Palabras clave: Absorción, destilación, validación, puesta en marcha, instalación, estado estructural, operatividad.

INTRODUCCIÓN

Los procesos de separación como la destilación y la absorción han sido unas de las operaciones más empleadas en la industria durante muchos años y actualmente. Es fundamental para un/a Ingeniero/a Químico/a conocer y entender a detalle dichos procesos, por esta razón, la Universidad de América inició la construcción del Centro de Procesos e Innovación para la Industria Sostenible (CEPIIS), el cual consta de diferentes áreas y zonas de procesos, en el presente trabajo el foco de estudio es la zona CEPURE o Centro de Purificación y Refinación.

CEPURE cuenta con una unidad de destilación continua y una unidad de absorción de gases, las cuales deben ser instaladas en el Centro de Procesos, posteriormente se debe realizar un proceso de puesta en marcha y por último un proceso de validación. Para esto se debe realizar un plan operativo y de seguridad que abarque cada una de las características, necesidades y requerimientos de las unidades de proceso.

Se realiza un estudio y revisión bibliográfica de manera que se recolecte la información necesaria para identificar los parámetros operativos y de seguridad de cada una de las unidades de proceso. Posteriormente se realiza el proceso de puesta en marcha mediante una evaluación del estado operativo y estructural de cada uno de los componentes de las unidades de proceso durante la etapa de instalación de las unidades de forma que se verifique y se determine la funcionalidad de cada uno de los instrumentos y equipos, asegurando así el correcto funcionamiento de las columnas en la etapa posterior.

Por consiguiente, se realiza el proceso de validación en donde se realiza la simulación del proceso estipulado por el proveedor de los equipos, de esta manera se prevé cualquier posible eventualidad que se pueda presentar durante la práctica o arranque de las columnas de destilación y absorción.

Por último, se realiza un análisis de lo presentado en la etapa de validación de manera que se puedan presentar alternativas en caso de eventualidades o irregularidades no previstas en el proceso y de esta manera realizar los cambios necesarios para asegurar el funcionamiento óptimo de las unidades.

OBJETIVOS

Objetivo General:

- Desarrollar un plan operativo, considerando parámetros de seguridad industrial, para la puesta en marcha y validación de los equipos escala piloto, ubicados en CEPURE del CEPIIS.

Objetivos específicos

- Establecer los parámetros operacionales y de seguridad de las unidades de proceso, en términos de ubicación en planta y proyección de uso.
- Evaluar el estado operativo y estructural de los instrumentos y equipos que conforman las unidades de destilación y absorción durante la etapa de instalación de las unidades.
- Verificar mediante una simulación en nivel de ingeniería conceptual, las variables criterio para el funcionamiento de las unidades de proceso, de acuerdo con lo establecido por el proveedor e información aplicable a las unidades de la zona.
- Analizar la información registrada en el proceso de validación, generando posibles alternativas de operación, encaminadas a la proyección de uso.

1. GENERALIDADES DE LA EMPRESA

1.1. Planta piloto

La Universidad de América en busca de mejorar la calidad del aprendizaje de los estudiantes, inició un proyecto para la construcción de una planta a escala piloto que abarca los principales procesos de ingeniería en la industria, tales como purificación, refinación, tratamiento de aguas, optimización y control, transformación y adecuación, procesos biológicos y control de calidad. A finales del año 2021 inició la construcción del Centro de Procesos e Innovación para la Industria Sostenible (CEPIIS), ver Figura 1, con la ayuda de ingenieros, arquitectos y diseñadores expertos en el campo y además con el apoyo investigativo de los estudiantes de últimos semestres, con el fin de generar un acercamiento a la industria y así mismo aplicar los conocimientos adquiridos durante su formación académica.

1.2. Centro de purificación y refinación

En la industria mundial uno de los procesos más empleados es la refinación, este se emplea en busca de la obtención de diferentes productos usados de manera cotidiana. La refinación está constituida por una línea de procesos continuos en donde se realiza la separación, transformación y purificación, principalmente a partir de hidrocarburos; la dificultad y las especificaciones operativas están directamente relacionadas con el tipo de producto a obtener y la pureza que se requiera de acuerdo con las necesidades de la industria. [1]

La purificación como proceso de separación es un método por el cual cambian las cantidades relativas de la sustancia en una mezcla, ya sea homogénea o heterogénea. Principalmente se busca aislar o eliminar sustancias presentes, consideradas contaminantes parcial o completamente. Adicionalmente se busca alterar la composición de la mezcla de forma que sea posible analizar dos o más componentes de manera individual, con el fin de realizar un análisis, seguimiento y/o una integración a procesos contiguos. [2]

El centro de purificación y refinación (CEPURE), está constituido por un sistema de absorción y un sistema de destilación, de manera que se abarcan procesos de separación y transformación, con el fin de realizar operaciones encaminadas a lo practicado en la industria a nivel mundial. El foco

de esta investigación es realizar una guía operativa y de seguridad que garantice el correcto funcionamiento de las unidades previamente mencionadas priorizando el rendimiento óptimo de las mismas y la seguridad del proceso, esto teniendo en cuenta y asegurando un manejo adecuado de los desechos y así no generar un daño ecológico, dando pie al desarrollo de un proceso con tecnologías limpias. [3]

Figura 1.

Render del Centro de Procesos e Innovación para la Industria Sostenible (CEPIIS).



Nota: Se evidencia el Render del Centro de Procesos de la Universidad de América o CEPIIS. Tomado de Equipo CEPIIS, “Renders Centro de procesos de innovación para la industria sostenible (CEPIIS),” Fundación Universidad de América, 2022. Sin publicar.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Conceptos generales

Para la realización del proyecto satisfactoriamente es importante relacionar los diferentes conceptos claves y su implicación en el trabajo para lograr los objetivos planteados en la presente investigación. Inicialmente es fundamental mencionar que el plan operativo debe considerarse como una guía que indica los pasos a seguir durante el proceso de puesta en marcha y validación de las unidades, debe describir el orden secuencial de pasos a realizar indicando prioridades, tiempos, cantidades y especificaciones de seguridad. [4]

Adicionalmente en cuanto a los procesos a realizar los cuales son la puesta en marcha y el proceso de validación se debe tener en cuenta que la puesta en marcha es un proceso que se debe realizar contando con un plan general donde se identifique el orden y planificación de dicho proceso, lo anterior inicia con la formación del personal en cuanto al funcionamiento del CEPIIS, los equipos que lo componen, la seguridad industrial, la automatización y manuales de operación. Posteriormente se realiza una selección del orden específico de las actividades a realizar, por consiguiente, inicia la puesta en marcha inicial con el orden: llenado, circulación, calentamiento, refrigeraciones, devolución de productos y envío de productos. Por último, se inicia la prueba de garantías en donde se operan los equipos a condiciones normales para verificar la eficiencia, rendimiento y consumo de cada una de las unidades. [5]

En cuanto al proceso de validación es una actividad donde se realiza un análisis de la eficiencia y del rendimiento de las unidades de acuerdo con un plan o guía establecida con ayuda del proveedor, es la realización de una corrida de diseño que permite monitorear la variabilidad de las condiciones del producto deseado frente a lo establecido por el fabricante, además proporciona evidencia y resultados concretos que permiten establecer el estado operativo y de control que tiene cada una de las unidades. [6]

Por último, es imprescindible realizar la debida diferenciación entre los tipos de mantenimientos que deben ser tenidos en cuenta para el uso continuo de las unidades de proceso, en primera instancia el mantenimiento preventivo son aquellas actividades que se realizan para impedir y anticiparse a los posibles fallos que puedan ocurrir durante la operación de los equipos, para lograr

esto se deben ejecutar verificaciones programadas para asegurar las mejores condiciones en las estructuras, ensambles, sellos, soldaduras, sistemas, instrumentos y todo elemento sujeto a presentar averías o generar paros de emergencia en caso de verse afectados. [7]

En cuanto al mantenimiento predictivo son aquellas mediciones realizadas a los equipos de las unidades de proceso más propensas a presentar fallos, estas mediciones se realizan con la unidad en operación ya que de esta manera es posible identificar los fallos o averías, por ejemplo, realizar vibraciones para conocer el estado de los tornillos, tapas, ensambles, entre otros. [7]

2.2. Procesos de separación

En una planta industrial se realizan operaciones entre las que se encuentran: separación de fases, adición o eliminación de calor, trabajo en ejes en bombas o compresores, mezcla o división de corrientes, aglomeración de sólidos, reducción de tamaño de sólidos, y separación de sólidos por tamaño. En el proceso de separación, los componentes de una mezcla son inducidos a alcanzar el grado de separación, el cual depende directamente de las propiedades de las especies presentes en la mezcla inicial. Dicho proceso ocurre generalmente en los procesos de destilación y absorción por medio de la separación por creación de fase y por adición de fase [8].

2.3. Proceso de destilación

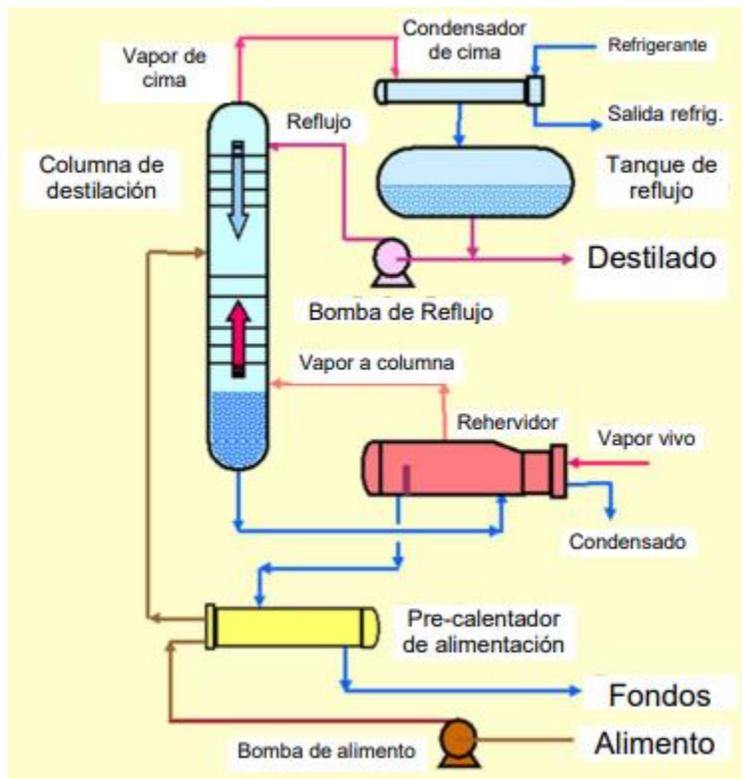
La destilación es una operación unitaria utilizada para la separación de mezclas multi – componentes, la cual posee un principio de operación basado en la diferencia de volatilidades entre dos o más compuestos. Al calentar una mezcla hasta el punto de burbuja se generan dos fases en equilibrio, vapor y líquido, estas fases poseen composiciones diferentes a la de la mezcla original, al remover el vapor y condensarlo se obtiene una mezcla final con mayor concentración del compuesto volátil [9].

Una columna de destilación consta de un punto de alimentación, el cual puede variar dependiendo de la composición de la mezcla inicial, a partir de esta la columna se divide en dos partes, la zona superior, llamada zona de enriquecimiento y la zona inferior llamada la zona de despojamiento. En la zona superior (zona de enriquecimiento), el vapor generado por el aumento de la temperatura asciende ingresando a un condensador, el cual posee una corriente de reflujo líquida que reingresa

a la torre en la misma zona, poniéndose en contacto con el vapor ascendente, arrastrando así los componentes pesados que contaminan la fase vapor. En la zona inferior (zona de despojamiento), el vapor generado por el rehervidor ingresa y asciende por la columna arrastrando los componentes livianos presentes en el alimento a la columna [10]. Este es el funcionamiento estándar y bajo el cual opera la columna de destilación continua en CEPURE.

Figura 2.

Proceso de destilación y sus componentes.



Nota: Se evidencia en la figura 2 el proceso de destilación y los componentes que se deben emplear en una unidad de destilación, además de las direcciones de las corrientes y sus respectivos reflujos. Tomado de Process Solutions and Equipment, “Manual de Operación. Planta de Destilación Continua,” p. 57, 2018. Sin publicar. [11]

Las variables o factores para tener en cuenta durante el análisis de una operación de destilación son el caudal de alimentación, la temperatura, la composición, la presión y la fase, el grado deseado de separación de los componentes presentes en la mezcla de alimentación, la presión de operación,

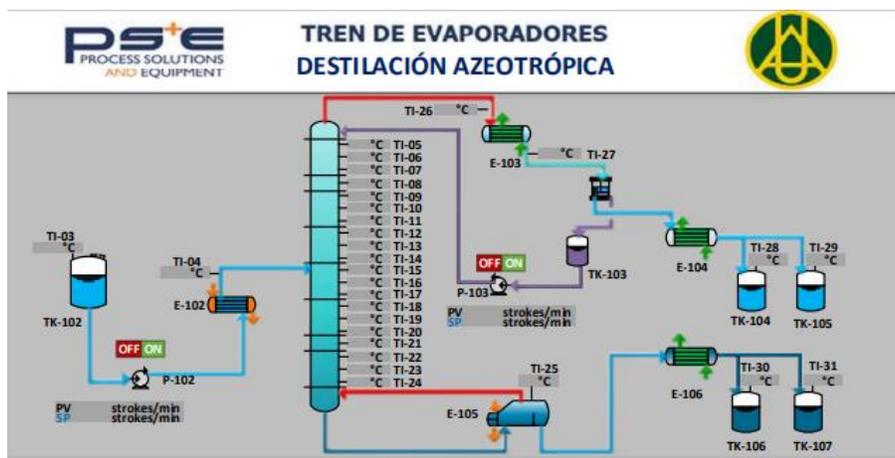
la cual debe estar por debajo de la presión crítica de la mezcla, la caída de presión para operaciones al vacío, la relación de reflujo mínima y real, el número de etapas y la eficiencia de etapa, el tipo de condensador ya sea total, parcial o mixto, el grado de subenfriamiento del reflujo líquido, el tipo de rehervidor ya sea parcial o total, el tipo de bandejas, la altura de la columna, etapa de alimentación, diámetro de la columna y materiales de construcción. [8]

Existen alternativas de separación, tales como la destilación azeotrópica, extractiva y por cambio de presión, entre otras.

En la destilación azeotrópica se emplea un solvente, llamado el agente de separación, esta forma una mezcla azeotrópica con solo uno de los componentes presentes en la mezcla original de menor punto de ebullición, por esta razón se generan dos fases líquidas inmiscibles capaces de separarse fácilmente, posteriormente se separa el nuevo azeótropo del componente que no forma azeótropo con el solvente. El solvente es recuperado por cimas mediante un proceso de decantación [12].

Figura 3.

Esquema de la destilación azeotrópica.



Nota: Se evidencia en la figura 3 el esquema de la destilación azeotrópica al momento de realizar la selección de configuración de trabajo en la pantalla principal del sistema de operación de la torre de destilación. Tomado de Process Solutions and Equipment, “Manual de Operación. Planta de Destilación Continua,” p. 57, 2018. Sin publicar. [11]

En la destilación extractiva se adiciona un solvente más afín con uno de los componentes, modificando así la volatilidad relativa y permitiendo su separación por la fase líquida. Se emplean solventes con estructuras químicas similares al componente pesado de la mezcla original. La destilación extractiva tiene la ventaja de que no genera nuevos azeótropos y el componente con mayor volatilidad es destilado por cimas y el solvente es recuperado por el fondo de la columna. Comúnmente se emplea una columna de regeneración en donde ingresa la corriente de fondos de la columna principal para la recuperación completa del solvente [13].

Figura 4.

Esquema de la destilación extractiva.



Nota: Se evidencia en la figura 4 el esquema de la destilación extractiva al momento de realizar la selección de configuración de trabajo en la pantalla principal del sistema de operación de la torre de destilación. Tomado de Process Solutions and Equipment, “Manual de Operación. Planta de Destilación Continua,” p. 57, 2018. Sin publicar. [11]

La efectividad de un proceso de destilación extractiva depende de la correcta selección del solvente, se deben tener en cuenta diferentes aspectos tales como la termodinámica, en donde se encuentran la selectividad y el punto de ebullición, por consiguiente, la operación del proceso, es decir, la relación de arrastre, el flujo de alimentación, las condiciones de operación, costos, entre otros [13].

La destilación por cambio de presión emplea dos columnas las cuales cuentan con corrientes de reciclo entre ellas; dicho proceso se emplea para la separación de mezclas que presentan un azeótropo sensible a la presión. Inicialmente en una columna se obtiene un componente de la mezcla inicial y por la otra corriente, el azeótropo, esta última corriente ingresa a una segunda columna de destilación que opera a una presión mayor, en dicha columna se obtiene el otro componente a separar de la mezcla original y un nuevo azeótropo que se puede recircular a la primera columna [14].

Figura 5.

Esquema de la destilación convencional o simple.



Nota: Se evidencia en la figura 5 el esquema de la destilación convencional al momento de realizar la selección de configuración de trabajo en la pantalla principal del sistema de operación de la torre de destilación. Tomado de Process Solutions and Equipment, “Manual de Operación. Planta de Destilación Continua,” p. 57, 2018. Sin publicar. [11]

2.4. Procesos de absorción

La absorción de gases es una operación unitaria empleada para la separación de mezclas multicomponentes. Dicha operación es empleada con el fin de separar mezclas de gases; eliminar impurezas, contaminantes o venenos de catalizadores de un gas; y recuperar productos químicos valiosos. Por lo cual, se pueden considerar como especies de interés todos los componentes presentes en la mezcla de gases, solo los componentes que fueron transferidos o los que no fueron

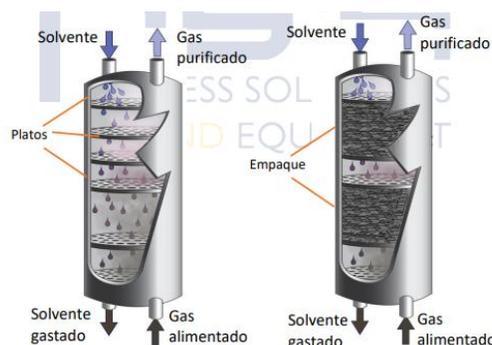
transferidos. Las especies transferidas al líquido absorbente se denominan solutos o absorbidos [15].

La operación está basada en la diferencia que se presenta en la distribución de cada componente que hace parte de la mezcla en las fases líquida y gaseosa en condiciones de temperatura y presión determinadas. Cuando un sistema constituido por dos fases, en este caso, gas-líquido se lleva a un estado de equilibrio bajo condiciones especificadas de presión y temperatura las moles totales que conforman el sistema se distribuyen entre las dos fases de una forma específica, este comportamiento se define por medio de los parámetros fisicoquímicos de las sustancias que conforman la mezcla [16]

Para la elección del solvente se estudia que uno de los componentes de la mezcla sea prácticamente insoluble en este líquido, esto con el fin de obtener una gran eficiencia en el proceso de separación de los componentes. Otra de las propiedades del solvente a estudiar es que este no sea volátil, con el objetivo de que no se contamine la fase gaseosa para obtener el componente volátil lo más puro posible y además de no tener gran cantidad de pérdidas. El proceso se trabaja a bajas temperaturas y con presiones superiores a la presión atmosférica ya que los gases tienden a aumentar su solubilidad en líquidos cuando se ve un aumento en la presión. [16]

Figura 6.

Proceso de absorción en columna de platos y columna empacada



Nota: Se evidencia en la Figura 6 el esquema del proceso de absorción, a la izquierda en una columna de platos y a la derecha en una columna empacada. Tomado de Process Solutions and Equipment, “Manual de operación. Planta de Absorción de Gases,” p. 37, 2018. Sin publicar. [17]

2.5. Límites operativos de las unidades de destilación y absorción por material de fabricación

Los límites operativos son criterios estipulados mediante una serie de características propias del proceso o del equipo con el fin de preservar la seguridad. Los procesos cuentan con un gran número de variables peligrosas, estas deben ser vigiladas constantemente para evitar riesgos a nivel industrial. Los efectos de estas se pueden ver reflejados de manera inmediata o al transcurrir el tiempo.

Estas limitaciones están dadas por el material de construcción de las unidades y las sustancias a emplear en la operación habitual del equipo de manera que no se vea afectado el material de la columna ni de los equipos relacionados a dicha unidad. Es fundamental realizar esta distinción de sustancias químicas que presenten compatibilidad con el material de fabricación de los equipos debido a que se pueden presentar niveles de corrosión no recomendables o que lleguen a afectar la funcionalidad de las unidades de proceso.

La unidad de absorción cuenta con límites de temperatura y presión los cuales determinan los valores máximos y mínimos que esta puede tomar en cada una de dichas variables. Sin embargo, se debe analizar el material del cual está compuesta la unidad. Como se mencionó previamente, dicha unidad está construida en acero inoxidable 304 y cuenta con teflón (PTFE) en secciones específicas. Estos materiales cuentan con limitaciones en cuanto al uso de sustancias, ya que existen ciertas sustancias con características particulares las cuales afectan su estructura, deteriorando su calidad y asimismo ocasionan imprevistos en los procesos a realizar.

El politetrafluoroetileno, más conocido como teflón es un polímero de la familia de los fluoro polímero, este material posee características exclusivas las cuales lo hacen resaltar. Cuenta con altos índices de estabilidad térmica y resistencia química que no es usual ver en polímeros. De igual manera posee resistencia eléctrica con superficie antiadherente gracias a su bajo coeficiente de fricción, tiene una tensión superficial extremadamente baja, lo que indica que prácticamente no hay ningún material que se adhiera al PTFE y es muy difícil de soldar. Sin embargo, cuenta baja resistencia mecánica y un gran peso comparado con otros plásticos lo que dificulta su implementación en distintas aplicaciones. [18]

Una gran ventaja de este material es que es inerte y resistente a los químicos, es decir, que no reacciona con otras sustancias químicas. Esta característica se debe a la protección que proporcionan los átomos de flúor sobre la cadena carbonada del polímero. En ese orden, gracias a su baja reactividad se obtiene una toxicidad prácticamente nula convirtiendo a este material en uno de los mejores para aplicaciones en procesos de fabricación de medicinas, alimentos, cosméticos y pinturas. [19]

Las resinas hechas en Teflón (PTFE) proporcionan una corteza efectiva para proteger recipientes y columnas de acero y plástico reforzado, las cuales son utilizadas en reacciones, destilaciones, absorciones y otros procesos químicos. Estos revestimientos prolongan la vida útil del equipo, reducen el mantenimiento del mismo y protegen la pureza del producto a obtener [20].

Como se mencionó anteriormente, el material de fabricación de la unidad de destilación y absorción es el acero inoxidable 304; El acero inoxidable es un conjunto de aleaciones especiales conocido por su excelente resistencia a la corrosión y es el empleado en la fabricación de las unidades objeto de estudio de la presente investigación, se encuentra clasificado como acero austenítico. [21]

Adicionalmente existen variaciones o modificaciones de uno o varios elementos de aleación de manera que se obtienen diferentes grados dentro del mismo grupo o clasificación para mejorar las propiedades y/o las aplicaciones. La base de estos aceros inoxidables son una combinación del níquel, cromo y manganeso, los cuales se pueden corregir con cobre y nitrógeno. [22].

Tabla 1.

Composición química del acero inoxidable 304

Composición	AISI 304
Carbono (C) máx..	0.08
Manganeso (Mn) máx..	2.00
Fosforo (P) máx..	0.04
Azufre (S) máx..	0.03
Silicio (Si) máx..	0.75

Cromo (Cr). Max	18 – 20
Níquel (Ni) máx..	8 - 11

Nota: La tabla 1 muestra la composición del acero inoxidable 304. Tomado de: PALS.A. Materiales Construcción S.L., “Ficha Técnica Acero Inoxidable AISI 304.” p. 2 [23]

El acero inoxidable 304, como se mencionó anteriormente es un acero austenítico, es decir, acero al Cromo – Níquel, posee propiedades propias como buena respuesta de tipo mecánica, es decir, para los procesos de soldadura, curvado, corte laser, entre otros. Es idéntico en cuanto a acabado y estética y posee gran durabilidad. [22].

La composición química se evidencia en la Tabla 1, además cuenta con niveles bajos de carbono lo que implica una buena resistencia a la corrosión, para esto se han realizado diferentes ensayos en donde se emplean ácidos a niveles distintos de temperatura para monitorear la pérdida de peso del acero [23].

2.5.1. Límites operativos de la unidad de absorción y destilación por sustancia química

El gran número de aplicaciones para el teflón (PTFE) se explica mediante las propiedades que posee. Entre las más importantes y significativas se encuentra la inercia química, es decir, que este material no reacciona con otros compuestos químicos y su estructura no es afectada por los mismos; la gran resistencia a los agentes atmosféricos, ya que por medio de diversos estudios de exposición al ambiente no se notó un cambio significativo en el material. Este material también es un buen aislante eléctrico, no es adhesivo y tiene un bajo coeficiente de fricción [24].

Gracias a su resistencia química el teflón (PTFE) posee una amplia lista de sustancias químicas a las cuales presenta una alta resistencia, la cual abarca a aldehídos, ácidos tanto débiles como fuertes, esterés, hidrocarburos alifáticos, aromáticos y halogenados, cetonas, alcoholes y sulfóxidos.

Una de las propiedades más especiales del PTFE es su excelente resistencia química, a excepción de algunas condiciones extremas, como los metales alcalinos fundidos o el flúor elemental. Esto se debe a que el PTFE no es soluble en ningún solvente orgánico. Incluso los ácidos agresivos

como el agua regia no pueden atacar al PTFE. El fundamento de esta característica es por el fuerte enlace entre el carbono y los átomos de flúor y la protección de los átomos de carbono por los átomos de flúor circundantes [25].

Tabla 2.

Resistencia del teflón (PTFE) con respecto a grupos de sustancias químicas.

Sustancia	Resistencia del PTFE
Ácidos diluidos o débiles	1
Ácidos fuertes o concentrados	1
Alcoholes alifáticos	1
Aldehídos	1
Aminas	1
Ester	1
Hidrocarburos alifáticos	1
Hidrocarburos aromáticos	1
Hidrocarburos halogenados	1
Cetonas	1
Ácidos oxidantes, reactivos	1

Nota: En la Tabla 2 se observa la compatibilidad de ciertos grupos de sustancias usados ampliamente en la industria con respecto al teflón (PTFE) siendo “1” excelente resistencia química, “2” buena a limitada resistencia química y “3” Poca resistencia química Tomado de Vacuubrand, “Tabla de compatibilidad química,” pp. 1–2, 2019, [Online]. Available : https://www.vacuubrand.com/context/brochures/es/Flyer_ChemistryCompatibility_ES_SCREEN.pdf. [25]

Por otro lado, en la industria química se hace uso del acero inoxidable, uno de los más utilizados es el AISI 304, por ejemplo, en la producción de ácido nítrico, ácido sulfúrico y en ciertas condiciones se emplea para producción de compuestos orgánicos y alcalinos [26]. A continuación, se realiza una descripción y un análisis de la compatibilidad de diferentes sustancias con el acero inoxidable empleado para la fabricación de la unidad de destilación y de absorción

Tabla 3.*Resistencia del acero inoxidable 304 con respecto a grupos de sustancias químicas.*

Sustancia	Resistencia del AISI 304	Observaciones
Ácidos orgánicos	1-2	Los ácidos con excelente resistencia son ácido acético (10%), ácido acético (80%) y ácido nítrico (30%)
Ácidos inorgánicos	2	Tales como el ácido sulfúrico a condiciones de operación específicas y el ácido fosfórico
Aceites	2	Aceite de coco, de linaza, de maíz, mineral, de palma, de oliva poseen buena resistencia química
Cloruros	3	El material es susceptible a presentar corrosión por ambientes salinos o por soluciones de cloruro presentando corrosión por picadura.
Acetatos	2	Tales como acetado de etilo, de butilo y de sodio
Alcoholes	1-2	Los alcoholes que presentan excelente resistencia son alcohol butilo, de bencilo y propílico. Los demás presentan buena resistencia química
Carbonatos	1	Tales como el carbonato de calcio y el carbonato de potasio
Éter	1	Tales como éter de isopropilo y éteres
Hidróxidos	1	Tienes buena resistencia química la mayoría de los hidróxidos, aquellos con excelente resistencia son el hidróxido de magnesio, de sodio, férrico

Sulfatos	1	Tienen excelente resistencia química el sulfato de potasio, de zinc, de bario y de níquel
-----------------	---	---

Nota: En la Tabla 3 se observa la compatibilidad de ciertos grupos de sustancias usados ampliamente en la industria con respecto al acero inoxidable siendo “1” excelente resistencia química, “2” buena a limitada resistencia química y “3” Poca resistencia química. Tomada de: Industrial Hydraulics Products, “Guía de Resistencias Químicas,” p. 8, 2012. [27]

2.6. Tipos de operación de destilación

En la industria química es posible realizar diferentes tipos de operaciones mediante una unidad de destilación, teniendo en cuenta la capacidad, y las limitaciones por material estudiadas anteriormente, se enuncian en la Tabla 4 las posibles operaciones, mezclas o experimentos que se pueden realizar en la unidad de destilación continua.

Producción de perfumes, obtención de bebidas alcohólicas, obtención de azúcares, obtención de aceites, obtención de ácido acético, obtención de glicerina.

Tabla 4.

Tipos de experimentos en la unidad de destilación.

Tipo de experimento	Tipo de operación
Destilación normal	Mezcla agua etanol al 50% p/p
	Producción de perfumes
	Obtención de glicerina por destilación de jabones
	Destilación del fermento de frutas para obtención de bebidas alcohólicas
	Desalinización del agua de mar
	Producción de bebidas alcohólicas como vodka o whiskey

Destilación azeotrópica	Mezcla 1% butanol en agua
	Separación de la mezcla propanol y agua con iso-octano como solvente para arrastre
	Separación y análisis del comportamiento azeotrópico de agua, propanol y ciclohexano
Destilación extractiva	Deshidratación de etanol azeotrópico con propilenglicol
	Separación de ácido acético y agua a concentraciones de 72% y 27% respectivamente
	Proceso de separación empleando sales para la obtención de etanol deshidratado.

Nota: En la Tabla 4 se evidencian una serie de experimentos posibles a realizar en la unidad de destilación. Tomado de: Process Solutions and Equipment, “Manual de Operación. Planta de Destilación Continua,” p. 57, 2018.[11]

2.7. Tipos de operación de absorción

En la unidad de absorción de gases se puede llevar a cabo la absorción física y la absorción química. En general, la absorción se basa en la separación de una mezcla gaseosa por medio del contacto con un líquido, esto con el fin de que el líquido pueda disolver de manera selectiva uno o dos componentes del gas formando una disolución de estos en el líquido [28].

La absorción física es cuando el gas soluto se elimina por medio de las propiedades de solubilidad que este presenta frente al líquido usado como solvente [29], por otro lado, la absorción química es cuando el gas soluto que se desea eliminar reacciona con el líquido solvente y este queda en solución [30].

El principio fundamental de la operación unitaria es el mismo en las dos circunstancias, sin embargo, estas se diferencian en la forma en que se obtiene la separación de las sustancias. Por lo cual, en la unidad de absorción de gases del Centro de Procesos e Innovación para la Industria Sostenible (CEPIIS) se puede realizar los dos tipos de absorción.

Tabla 5.

Tipos de operación a realizar en la unidad de absorción de gases.

Tipo de operación	Reactivos
Obtención de ácido sulfúrico	Absorción de trióxido de azufre en ácido sulfúrico (T=70°C)
Fabricación de ácido clorhídrico	Se obtiene a partir de la reacción entre NaCl y H ₂ SO ₄ , el HCl se absorbe en agua para obtener HCl al azeotrópico (20,2%)
Producción de ácido nítrico	A partir del amoníaco (NH ₃) se obtiene el dióxido de nitrógeno (NO ₂), el cual se absorbe en agua para obtener el ácido nítrico (HNO ₃). Se beneficia a bajas temperaturas
Obtención de gas de síntesis	Es una mezcla de gases de hidrógeno y monóxido de carbono, los cuales son separados para posteriormente utilizarlos para la producción de amoníaco.
Gases de refinería	Son generalmente los Gases Licuados de Petróleo (GLP) o también en la remoción de compuestos orgánicos de azufre.
Remoción de dióxido de carbono	Se realiza una absorción química mediante el uso de alquil-aminas

Procesamiento de gas natural	Remoción de los gases ácidos dióxido de carbono (CO ₂) y sulfuro de hidrógeno (H ₂ S) en torres de absorción con solventes de soluciones acuosas de alcanolaminas.
Eliminación de óxidos de nitrógeno	Lavado con agua o emplear determinados productos químicos para que reaccionen con estos óxidos y fijen el nitrógeno en compuestos estables que luego se deben retirar del agua de desecho.

Nota: En la Tabla 5 se evidencian diferentes operaciones o experimentos a realizar en la unidad de absorción de gases con sus respectivos reactivos y condiciones de operación

2.8. Posibles fallos en la unidad de destilación

Para la ejecución y el completo trabajo del Centro de Procesos, los estudiantes de último semestre realizaron diferentes proyectos de grado de modo que se permita su participación en la planeación, diseño, construcción, montaje y arranque de todas las unidades de proceso que se encuentran en el CEPIIS. Uno de los proyectos realizados es la Propuesta de un Plan de Gestión de Riesgo en el Centro de Procesos de la Universidad de América utilizando herramientas de Análisis de Riesgo, WHAT IF (¿Qué pasa sí?), HAZOP (Hazard and Operability Analysis) y la metodología BOW-TIE (Análisis de causas/consecuencias o corbatín) realizado por los Ingenieros Mariana Espitia y Mateo Vargas, se emplearon las técnicas de identificación de riesgos previamente mencionadas (What if, HAZOP y Bow-Tie), en donde se realizó una identificación de los fallos o riesgos en el proceso del Centro de Purificación y Refinación (CEPURE), aquellos que tienen una mayor probabilidad de ocurrencia en operación de las unidades se enuncian a continuación y en el ítem 2.9.

Inicialmente se definen las variables principales de la unidad de destilación, las cuales son la presión, el flujo de vapor y el flujo del líquido principalmente; se pueden presentar diferentes fenómenos los cuales se encuentran enunciados en la Tabla 6 a continuación.

Tabla 6.

Fenómenos que se pueden presentar en la columna de destilación.

Fenómeno	Definición
Lagrimeo	Generado cuando el flujo de la corriente gaseosa no es suficiente para que el líquido se mantenga en el plato, lo que genera que el líquido caiga por los agujeros de este
Arrastre de gotas	Se presenta cuando el flujo de la corriente de gas es muy alto y en el momento en el que el gas asciende arrastra el líquido, generando cambios en la composición por plato
Inundación	Cuando se dificulta que el líquido descienda, debido al flujo de gas, este se empieza a acumular y no se genera un buen contacto entre ambas fases
Vaciado de platos	Cuando el flujo de gas es insuficiente, el líquido disminuye rápidamente provocando que la columna se vacíe

Nota: En la Tabla 6 se enuncian los posibles fenómenos que pueden ocurrir en la columna de destilación y lo que generan en la unidad de operación. Tomado de: Sergio Jesús and P. O. de Castro, “Control de Columnas de Destilación,” p. 98, 2014. [31]

Adicionalmente a los fenómenos que se pueden presentar, es fundamental tener en cuenta los fallos o inconvenientes que pueden ocurrir en cada uno de los equipos que componen la unidad de destilación, estos se presentan en la Tabla 7 a continuación. Tener en cuenta el capítulo 3, ítem 3.1. Descripción de la unidad de destilación continua.

Tabla 7.

Posibles fallos en los equipos que componen la unidad de destilación continua.

Parámetro	Equipo	Posible fallo	Consecuencia
Flujo	Tanque de almacenamiento de reactivo y de solvente	Exceso de carga en la alimentación	Es posible que se presente un derrame del reactivo o el solvente superando el volumen de diseño, afectando la integridad del personal
		Fuga o escape en las tuberías	Es posible que se genere un sobrecalentamiento en el motor de la bomba que se encuentra entre el tanque de alimentación y el intercambiador de calor
	Intercambiadores de calor	Obstrucción de tuberías	Pérdida de suministro de fluido del servicio industrial – Baja eficiencia en el intercambiador
		Mayor presión del líquido a la salida de la bomba	Baja eficiencia en el equipo, afectaciones en la transferencia de calor
		Fallas en la alimentación por defectos en la bomba	Sobrecalentamiento del fluido por falta de regulación
		Alta o baja presión corriente arriba	Sobrepresión en la tubería y fallos en la bomba por golpe de ariete
	Columna de destilación (ingreso)	Fuga, obstrucción o rotura de la tubería	Parada de emergencia, sobrecalentamiento del rehervidor,

		formación de espuma en los sumideros de la columna
	Avería en la bomba de alimentación	Caudal de reflujo ineficiente y aumento de la temperatura
	Aumento de presión del fluido a la salida de la bomba	Riesgo de inundación de la columna
	Mayor flujo de alimento	Aumento en la presión de la columna por inundación en el fondo
Columna de destilación (fondos)	Fugas en tubería o en alguna línea del rehervidor	Sobrecalentamiento del rehervidor, posibles derrames de reactivos y posibles derrames del reactivo
	No se realiza carga previa en el rehervidor	Riesgo de contaminación y mal funcionamiento de la columna
	Inundación del fondo de la columna	Riesgo de ruptura en tramos de tubería cercanos al fondo de la columna
Columna de destilación (cimas)	Falla en el rotámetro o indicador de flujo	Posible parada de emergencia
	Variación de la relación de reflujo	Riesgo de inundación de la columna
	Temperaturas elevadas en cimas	Desgaste del equipo

Nivel	Tanque de almacenamiento de reactivo y de solvente	Obstrucciones en tuberías	Genera acumulación de reactivo lo que genera cambios o variaciones en las condiciones de operación
		Obstrucción en válvulas de control	Es probable que el tanque de alimentación quede completamente vacío, afectando el proceso y el funcionamiento de los equipos
Presión	Tanque de almacenamiento de reactivo y de solvente	Falla en la válvula de alivio V-020 y V-001	Sobrepresión en el tanque generando pérdida de contención, ruptura de sellos y de tuberías
		Aumento repentino de la presión	Mayor desgaste en el equipo y variación de las condiciones
		Disminución repentina de la presión	Riesgo de implosión en el tanque. Variación de las condiciones óptimas de operación
	Intercambiadores de calor	Ensuciamiento o generación de incrustaciones	Variación de las condiciones de operación óptimas
		Aumento de la caída de presión	Variación de las condiciones de operación óptimas
		Variación de la temperatura del fluido	Desgaste del equipo

	Columna de destilación (ingreso)	Variación de la temperatura óptima del fluido de ingreso	Formación de espuma en los sumideros de la columna
		Obstrucción de válvulas	Perdida de eficiencia de la operación de la columna y variación de las condiciones de operación
	Columna de destilación (cimas)	Fallos en el funcionamiento del condensador de la columna	Perdida de eficiencia del proceso
	Columna de destilación (fondos)	Aumento del nivel en la columna, aumento de liberación en la carga	Desgaste del equipo, variación de las condiciones de operación
		Falla el indicador de presión	Perdida de eficiencia en la operación de la columna
Temperatura	Tanque de almacenamiento de reactivo y de solvente	Disminución de temperatura repentino	Riesgo de fragilización del material de los tanques y desgaste en el equipo
		Temperatura ambiente baja o alta	Desgaste del equipo, riesgo de fragilización del acero inoxidable
	Intercambiadores de calor	Obstrucción de las tuberías	Variación de las condiciones de operación, desgaste del equipo, mayor demanda de flujo de servicio

	Fallo en las tuberías por rotura	Mayor consumo energético y desgaste en el equipo
Columna de destilación (ingreso)	Aumento de temperatura en el flujo de servicio	Mal funcionamiento de la columna, desgaste, cambios en las condiciones de operación
	Falla en el control del suministro de servicios industriales	Perdida de eficiencia en la operación de la columna, mayor gasto energético
Columna de destilación (cimas)	Aumento repentino de presión	Riesgo de sobrepresión de la columna
	Aumento del flujo de destilado	Dificultad en el proceso de separación y afectación en la pureza del producto deseado
Columna de destilación (fondos)	Aumento de los tiempos de ebullición	Perdida de eficiencia en la operación de la unidad de proceso
	Suministro deficiente de vapor en el rehervidor	Menor obtención de producto de destilado

Nota: Se realiza un análisis de los posibles fallos y las consecuencias que se pueden presentar teniendo en cuenta las variables fundamentales y cada uno de los equipos que componen la unidad de destilación. Tomado de: M. E. Velandia and M. S. Vargas Jiménez, “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,” 2022. [32]

Para todos y cada uno de los fallos enunciados en la Tabla 7 se cuenta con diferentes instrumentos que ayudan a mitigar el inconveniente, tales como indicadores de nivel, temperatura, válvulas de alivio de presión, tomas de muestras, controladores, entre otros. La forma detallada para su mitigación se enuncia al final del ítem 2.9 del presente documento explicado en conjunto con la unidad de absorción.

2.9. Posibles fallos en la unidad de absorción

En una unidad de absorción de gases se pueden presentar diversos fallos durante la puesta en marcha, la validación y el uso constante de cada uno de los equipos los cuales afectan directamente la integridad del equipo en consecuencia la correcta operación de este generando posibles desastres en el equipo, el edificio y la salud de las personas que se encuentran en el entorno. Por esta razón es muy importante prever cualquier tipo de fallos que se puedan presentar, con el fin de brindar la protección adecuada a los directamente relacionados con la operación y analizar la situación para evitarla.

En primera instancia se deben analizar las variables que se encuentran directamente implicadas en el proceso y las mismas que pueden causar un fallo sin una debida instrumentación y control. En este caso las variables críticas son el flujo del solvente, el nivel, la presión y la temperatura de cada una de las unidades pertenecientes al sistema de absorción.

Tabla 8.

Posibles fallas en la unidad de absorción de gases.

Parámetro	Equipo	Posible fallo	Consecuencia
Temperatura	Tanque de almacenamiento de reactivo y de solvente	Aumento o disminución de temperatura repentino debido a la naturaleza del solvente	Riesgo de fragilización del material de construcción del tanque Generación de cristalizaciones no deseadas dentro del tanque
		Fallo en el indicador de temperatura	

	Temperatura de transferencia del flujo de servicio muy baja o muy alta	Variación de las condiciones óptimas de operación Mayor deterioro en el equipo Aumento o disminución súbito de la presión
Compresor	El fluido de alimentación del compresor posee una elevada temperatura.	Variación de las condiciones óptimas de operación Mayor desgaste en el equipo y posibilidad de fugas en el mismo
Columna de absorción	Fallos en los indicadores de temperatura Falta de control de la temperatura durante los procesos realizados por la columna Obstrucción y/o taponamiento en tuberías y válvulas de suministro Avería o taponamiento en la bomba y/o compresor de suministro	Degradación del empaque o lecho de la columna Mayor desgaste del equipo al trabajar bajo temperaturas superiores a las de operación o diseño Pérdida de eficiencia en la operación de la columna

Presión	Tanque de almacenamiento de reactivo y de solvente	Venteo inadecuado del aire o vapor durante el llenado	Cavitación del sistema de bombeo de reactivo, conectado a los fondos del tanque
		Falla en la válvula de alivio	Variación de las condiciones óptimas de operación
		Aumento repentino de la presión	Riesgo de implosión en el tanque Variación de las condiciones óptimas de operación
		Bloqueo de bombas o líneas de succión	
		Bloqueo de venteo durante el vaciado	
	Compresor	El fluido de alimentación al compresor viene con una presión elevada	Se pueden producir fugas por las bridas Variación de las condiciones óptimas de operación
		Se presentan obstrucciones en las tuberías o válvulas V20/21	Mayor desgaste en el equipo y posibilidad de fugas en el mismo
	Columna de absorción	Aumento significativo de la presión del gas de entrada y/o aire húmedo de suministro	Baja eficiencia en el proceso de absorción debido a un menor flujo de producto Mayor consumo de energía en la bomba y el compresor debido al aumento de la potencia
		Ensuciamiento u obstrucción en válvulas o tuberías	

			Riesgo de fuga de gas, deterioro del material del equipo, sobre presión del equipo y baja eficiencia
Flujo	Humidificador de aire	Obstrucción en válvulas de alimentación y recirculación	Riesgo de sobrecalentamiento en el motor de la bomba de alimentación y posible ruptura de eje
		Ruptura o fuga en tubería	Derrame del solvente si se supera el volumen de diseño
		El flujo de la corriente de recirculación del solvente es bajo	Sobrepresión en la tubería debido al flujo excesivo en su interior
		No se controla el flujo de la corriente de recirculación del solvente recuperado	
	Columna de absorción	Obstrucción o taponamiento en tuberías, válvulas de suministro o en la bomba, compresor,	Riesgo de inundación de la columna
		Falla en la bomba de suministro de solvente fresco o en el compresor de suministro de aire seco	Aumento de la presión de la columna
			Baja eficiencia en el proceso de absorción
			Inconsistencia en el funcionamiento de la columna

		Aumento de la temperatura en el suministro	
Nivel	Tanque de almacenamiento de reactivo y de solvente	No se realiza regulación de nivel con las respectivas válvulas Acumulación del solvente por obstrucción en tubería Falla en el sensor de nivel	Variación de las condiciones óptimas de operación Cavitación del sistema de bombeo de solvente, conectado a los fondos del tanque Inundación de equipos por rebose no diseñados para soportar líquido

Nota: En la Tabla 8 se exponen los posibles fallos y las consecuencias que estos conllevan en la unidad de absorción de gases. Tomado: M. E. Velandia and M. S. Vargas Jiménez, “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,” 2022. [32]

Para realizar la debida mitigación de cada uno de los fallos expuestos anteriormente para cada una de las unidades objeto de estudio se emplean diferentes salvaguardas situadas en cada uno de los equipos. En el caso de los fallos que pueden ocurrir por aumento o disminución de flujo se cuenta con los indicadores de nivel situados en los tanques de almacenamiento, tanques colectores y el rehervidor, igualmente se encuentran las válvulas de apertura y cierre de suministro, por otro lado, en caso de presentar riesgo de inundación el tablero de control cuenta con un botón rojo el cual indica una parada de emergencia e inmediato bloqueo de bombas de suministro, adicionalmente las tuberías cuentan con indicadores de flujo que permiten visualizar las condiciones de operación.

En caso de los fallos que se pueden presentar en cuanto a la variable nivel, se cuenta con válvulas de control de nivel e indicadores de nivel situados en el tanque, en el caso de los fallos presentados

por presión se cuenta con las válvulas de alivio de presión y los indicadores de presión en las tuberías y en las columnas.

Por último, en el caso de que se presenten fallos enunciados anteriormente por aumento o disminución de temperatura se cuenta con los indicadores de temperatura en cada uno de los equipos, además de los situados a la salida e ingreso de los tanques e intercambiadores y las termocuplas situadas a lo largo de las columnas de destilación y absorción.

Cabe resaltar que para optimizar el sistema de respuesta a los posibles fallos es posible realizar un sistema más específico haciendo uso de lazos de control, empleando alarmas de baja y alta para cada una de las variables previamente especificadas, instalando controladores enlazados con los indicadores y las válvulas de forma que el proceso sea más automatizado y su control se de a través del tablero de control.

2.10. Proceso de puesta en marcha

La información para tener en cuenta para planificar una puesta en marcha es el número y tipo de personal requerido, la descripción de cada una de las actividades a realizar en el orden específico, las limitaciones que se puedan presentar, diagramas de flujo, diagramas eléctricos e instrumentales, especificaciones de los equipos, procedimientos analíticos, datos de la planta, hojas de registro y formatos para informes y la programación de reuniones con el fin de capacitar a las personas que van a estar en el proceso, así como la comunicación de los datos registrados. Posterior a la preparación y la especificación de la secuencia lógica, se realiza la puesta en marcha inicial, de esta manera se reducen las probabilidades de que ocurran incidentes [5].

Para la puesta en marcha inicial se debe realizar la secuencia: llenado, circulación, calentamientos, refrigeraciones, devolución de productos y envío de productos. Por último, los procedimientos de permisos de trabajo de deben mencionar debido a que en caso de hacer uso de sustancias corrosivas o inflamables en pruebas se debe precisar aprobaciones precisas por parte de una autoridad competente en la planta. Existe una fase fundamental en este proceso, la cual es la prueba de garantías, en la cual se inicia la operación de las unidades a las condiciones normales de operación, empleando las sustancias reales y en las condiciones a las que están diseñadas, esto con el objetivo de verificar los rendimientos de las unidades y cada uno de los sistemas que las componen. La

prueba de garantías debe cubrir, garantía de capacidad, de rendimiento, de consumo de servicios auxiliares y de residuos [5].

Durante la puesta en marcha, el plan de seguridad es indispensable ya que es el proceso que más riesgos posee en una planta. Cuando la planta está recién construida el nivel de peligrosidad durante este procedimiento aumenta debido a que todo el equipo es nuevo, por lo que no se han descubierto errores de ninguna clase. Por esto las pruebas que se realizan durante la puesta en marcha deben llevarse a cabo en pasos lentos y premeditados. Cada parte del sistema debe ser probado de manera independiente y puesta en operación de prueba con el uso de materiales seguros que no representen gran peligro, luego de que se realizan pruebas con fluidos seguros se puede avanzar con el uso de fluidos más riesgosos [33].

En las columnas se puede presentar corrosión y/o fatiga, dilatación térmica o contracciones por cambios bruscos de temperaturas, en el caso de la construcción, se pueden presentar válvulas con sentido de circulación invertido, errores o fallas en las tomas de muestras, en las bombas se puede presentar suciedad no eliminada, juntas o acoples inadecuados, soportes insuficientes que no soporten el peso de la columna y el fluido en su interior. En cuanto a la puesta en marcha de pueden presentar operaciones erróneas por fallas en la formulación de la secuencia, además de impurezas o problemas en los servicios auxiliares [33].

Gran parte de los problemas que pueden surgir en una planta se presentan durante las fases de parada y arranque de esta, estos momentos se pueden clasificar como peligrosos y críticos a comparación de la operación normal y continua de la planta por lo que se deben prever los posibles accidentes de manera que no se dañe el equipo ni se altere la capacidad de producción de este. Así no se produzcan incidentes imprevistos en algún momento se requerirá parar la planta para hacer mantenimiento o cambio de alguna pieza del equipo que no funcione satisfactoriamente por lo que se sugiere detener el proceso en intervalos establecidos para limpieza, mantenimiento y reparación con el fin de mantener los equipos en las mejores condiciones.

El plan operativo realizado para la ejecución del proceso de puesta en marcha se evidencia en el Anexo 12, este se realiza en formato de Check list de modo que sea una guía operativa que

considera parámetros de seguridad para el momento de realizar la práctica y puesta en marcha de cada uno de los equipos de las unidades de destilación continua y absorción de gases.

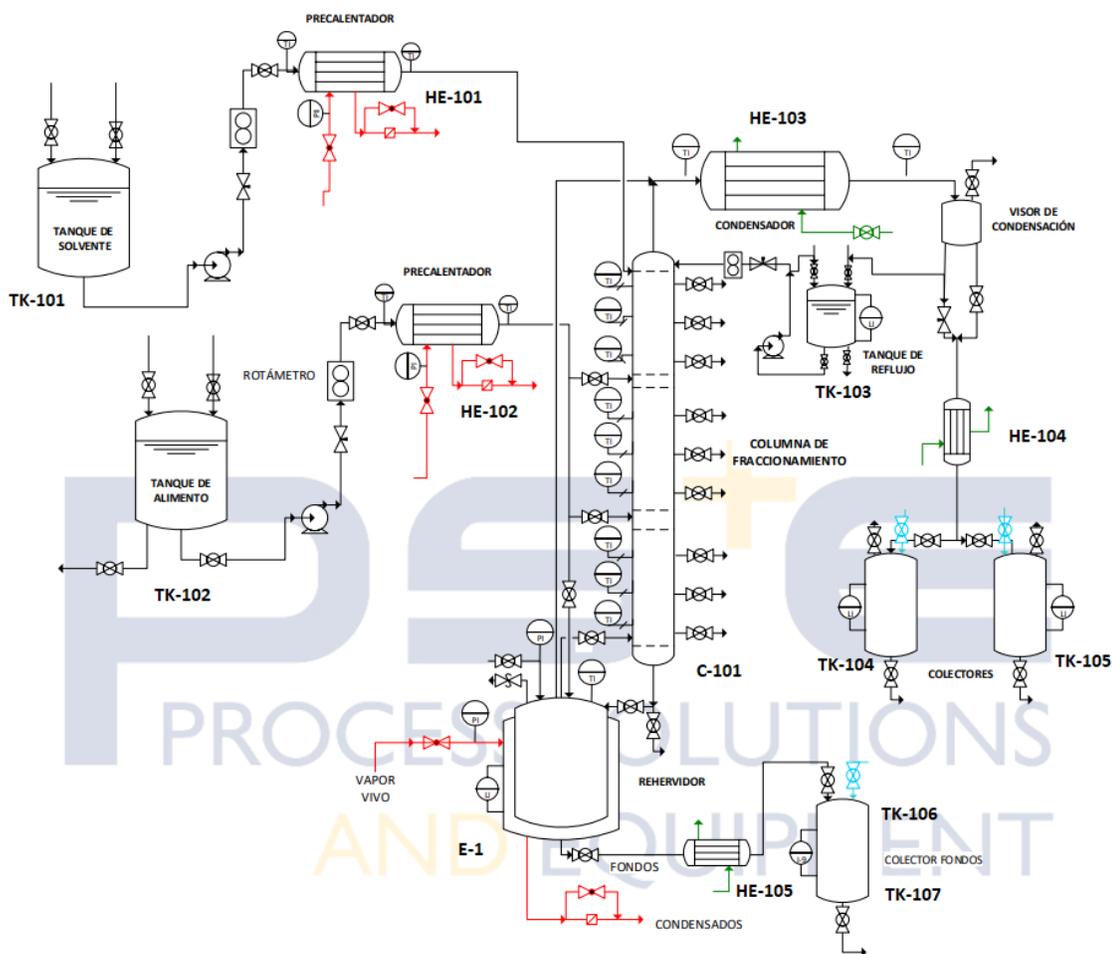
3. DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES DEL CEPURE

3.1. Descripción de la unidad de destilación continua

La unidad de destilación continua está construida en acero inoxidable 304 con acabado brillante, con escalera lateral para permitir el acceso a los diferentes espacios del equipo, puede ser utilizado para destilación de mezclas ideales y no ideales, destilación tradicional, extractiva y azeotrópica e igualmente en forma de destilación simple, tipo batch y continua [10]. Incluyendo soportes, tanques, la estructura y el condensador, la unidad de destilación alcanza los 6 metros de altura y su estructura se muestra a continuación:

Figura 7.

Diagrama planta de destilación continua.





Nota: En la Figura 7 se muestra el diagrama de la unidad de destilación continua, en donde se evidencian los instrumentos y corrientes que la componen. Tomado de: Process Solutions and Equipment, “Planta de Destilación Continua (Control Manual),” pp. 1–13, 2021. Sin publicar. [11]

3.1.1. Componentes de la unidad de destilación continua

La unidad está compuesta por el sistema de alimentación, la columna de destilación, el sistema de condensación y reflujo, tanques de acumulación de destilados, diferentes medidores y el tablero de control.

3.1.2. Sistema de alimentación

El sistema de alimentación comprende dos tanques cilíndricos con capacidad de 50L, con su respectiva bomba dosificadora de carga. Uno de los tanques es empleado para la mezcla problema TK-101 y el otro para el almacenamiento del solvente TK-102. Cuenta con un arreglo de válvulas, purga inferior con válvula y tapa removible con empaque. Cuenta con válvula de alivio, una línea de entrada, acople a línea de vacío, una conexión para termocupla y una entrada para llenado. El flujo de alimentación se conduce por bomba a través de un intercambiador de calor tubos y coraza HE-101. el flujo de solvente se conduce por bomba a través de un intercambiador de calor HE-102, ambos cuentan con sensores de temperatura a la entrada y salida del flujo [10]

3.1.3. Columna de destilación y rehervidor

La columna de destilación C-101, está construida en 3 secciones de un metro de altura y con 4” de diámetro, cuenta con posibilidad de alimentación en cada una y dos cabezales, superior e inferior. Las secciones están acopladas con flanche, empaques y tornillos, cuentan con aislamiento térmico, adicionalmente está llena de empaque al azar de alta eficiencia. Cada sección consta de 3 toma muestras para la fase líquida, 3 sensores de temperatura y un visor de vidrio. En los fondos consta de un sensor de presión conectado por cables al tablero de control [10]. Cabe aclarar que el diseño

de la columna con base en las tres secciones se realizó para brindar mayor facilidad al momento de la instalación y ensamble de la columna, sin embargo, esta conserva el funcionamiento tradicional de una columna de destilación como lo es el explicado en el ítem 2.3. del presente documento.

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

El rehervidor E-1, es un contenedor de acero inoxidable, con área de intercambio de calor sumergida y aislamiento térmico. Consta de un arreglo de válvulas externo, purga inferior, acoples para válvula para alivio atmosférico, conexiones de entrada para retorno a la columna, acoples para termocuplas y sensor de presión. El producto de fondos se envía a través de un enfriador HE-105 y se almacena en un tanque TK-106 y TK-107. [10]

3.1.4. Sistema de condensación y reflujo

En cuanto al sistema de condensación y reflujo, se emplea un intercambiador de coraza y tubos HE-103, un tanque de acumulación de reflujo TK-103 con su respectiva bomba y dos tanques cilíndricos como colectores en los cuales se almacena el destilado TK-104 y TK-105, después de pasar por un enfriador HE-104, además de un visor de condensación, el cual es un tanque con un arreglo de válvulas para la entrada del condensado, conexión atmosférica, salida al tanque de reflujo, para destilados y posibilidad de hacer separación de fases líquida. [10]

3.1.5. Tablero de control

En cuanto al tablero de control es aquella unidad de manejo en donde se permite el encendido de indicadores y bombas, cuenta con interruptor principal y parada de emergencia y se emplea un PLC Siemens S7 1200. [10]

3.1.6. Medidores y controladores

La unidad cuenta con regulación manual de flujos por medio de válvulas de aguja o globo y rotámetros para líquidos. La temperatura en diferentes puntos de la unidad se mide con

termocuplas tipo J o K. Los sensores de presión son transductores de alta precisión, los cuales pasan información a un PLC localizado en el tablero de control. El sistema puede contar con calentamiento eléctrico o por vapor de servicio. [10]

Figura 8.

Render de la unidad de destilación continua.



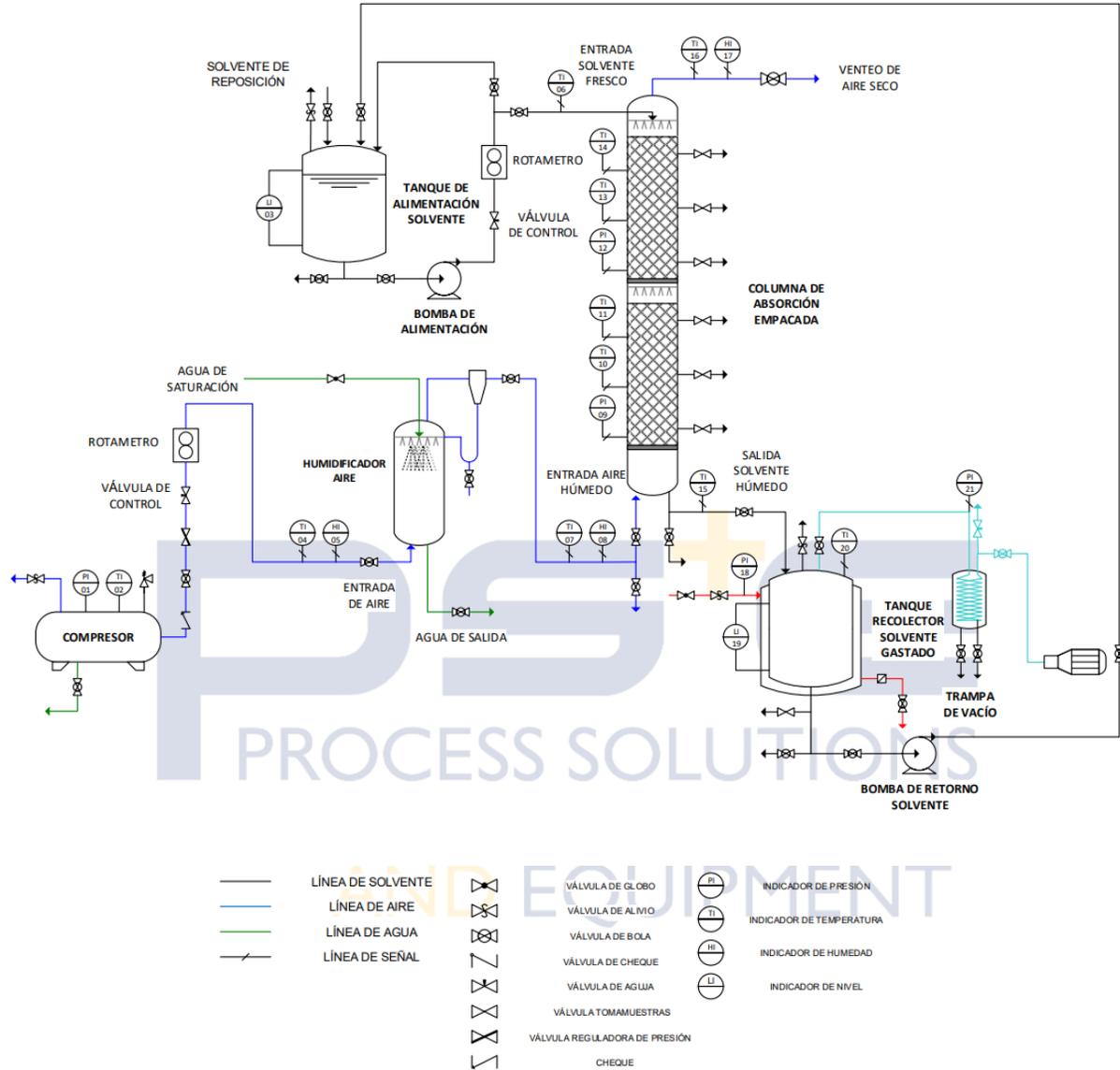
Nota: Se evidencia en la Figura 8 el Render de la unidad de destilación continua presente en el Centro de Purificación y Refinación (CEPURE) del CEPIIS. Tomado de [Equipo CEPIIS, “Renders Centro de procesos de innovación para la industria sostenible (CEPIIS),” Fundación Universidad de América, 2022. Sin publicar.

3.2.Descripción de la unidad de absorción de gases

La unidad de absorción de gases está compuesta de cinco sistemas: El sistema de generación de aire, el sistema de humidificación, la columna de absorción, los tanques de acumulación de solvente y el tablero de control. El equipo está construido en acero inoxidable 304, este sistema puede ser utilizado en una amplia gama de aplicaciones que hacen parte de la absorción de gases.

Figura 9.

Diagrama de la unidad de absorción de gases.



Nota: En la Figura 3 se evidencia el diagrama de la unidad de absorción de gases en donde se evidencian los equipos, corrientes e instrumentos que la componen. Tomado de: Process Solutions and Equipment, “Planta de absorción de gases (Control Manual),” 2021. Sin publicar. [16]

3.2.1. Componentes de la unidad de absorción de gases

La unidad de absorción está compuesta por cinco sistemas los cuales son el sistema de generación de aire, el sistema de humidificación, la columna de absorción, el sistema de almacenamiento de solvente y el sistema de vacío. Además de esto cuenta con un tablero de control y los diferentes medidores y controladores ubicados estratégicamente en cada uno de los sistemas anteriormente mencionados.

3.2.2. Sistema de generación de aire

El sistema de generación de aire que está compuesto básicamente por un compresor o cilindro de gas sintético seco, este equipo tiene una presión mínima de 2 bar y tiene un flujo de 20 L/min, cuenta con una purga periódica en el tanque acumulador, un filtro de aire con finalidad de remover las partículas sólidas y los aceites lubricantes que se puedan presentar, por último, con una línea de desagüe para remover las purgas provenientes del agua. Por parte de la instrumentación el compresor tiene un manómetro y regulador de flujo a la entrada del aire. [16]

3.2.3. Sistema de humidificación

El sistema de humidificación es, básicamente una columna humidificadora la cual está construida con acero inoxidable con una altura de 60 cm y un diámetro de 3". Tiene cabezales flanchados con acoples rápidos y un sistema de atomización de agua para poder asegurar una saturación completa. Este equipo tiene conexiones de entrada y de salida de gas y líquido, por medio de una tubería de 1/4" de acero inoxidable y válvulas de bola. En la salida de gas, la columna posee un ciclón con la finalidad de impedir la salida de gotas de arrastre y entrada de gotas de agua. [16]

3.2.4. Columna de absorción

El equipo correspondiente a la columna de absorción está constituido por dos secciones principales, las dos tienen 3" de diámetro y cuenta con cabezales en la parte superior e inferior. La altura total de la torre es de 2 metros, las dos secciones mencionadas anteriormente están acopladas con unión tipo "clamp", con el objetivo de que el equipo tenga un montaje y desmontaje rápido. Cada sección está empacada y constituida de material inerte con una dimensión 1/4". [16]

La columna cuenta con una totalidad de seis tomas de muestra para la fase líquida y un visor de vidrio, el cual se encuentra en el cuerpo principal. Además, consta de cuatro sensores tipo J, los cuales determinan el perfil de temperaturas a lo largo de la torre y dos sensores de presión para determinar la caída de presión en la misma; estos sensores están directamente conectados al tablero de control donde se realiza la consignación de los datos medidos. [16]

En medio de las dos secciones principales de la columna, se encuentra el soporte del empaque y el redistribuidor de líquido para evitar su filtración en las paredes del equipo. En la sección inferior se encuentra la entrada para vapor de 1" y una salida por la misma sección de ¼" con válvulas para descarga y purga del equipo. Mientras que en la parte superior se tiene una salida en tubería de 1" para generar ventilación del aire seco, e igualmente se cuenta con un acople de ¼" por donde se realiza la alimentación del solvente. [16]

3.2.5. Sistema de almacenamiento de solvente

El sistema de almacenamiento de solvente fresco está compuesto principalmente por un tanque cilíndrico el cual tiene una capacidad de almacenamiento de 50L de solvente y está hecho de acero inoxidable, cuenta con una conexión a la bomba centrífuga, con el fin de realizar la recirculación y la alimentación a la columna de absorción. El tanque cuenta con una tapa removible para facilitar el llenado, además de esto las válvulas de retorno, de purga inferior y la línea de descarga es tipo bola en acero inoxidable de ½". [16]

En contraste, se tiene el sistema de almacenamiento de solvente gastado, el cual cuenta principalmente con un tanque cilíndrico hecho en acero inoxidable con una capacidad de 50L, posee una chaqueta de calentamiento para facilitar el almacenamiento del solvente utilizado en el proceso y la regeneración de este. Este tanque tiene un sistema de válvulas de nivel visible externo en ½", en la línea de purga inferior se cuenta con una válvula de bola de ½" y una tapa flanchada removible. Sobre la tapa se encuentra una válvula de bola de ¼" para generar alivio atmosférico, la línea de entrada tiene una válvula de bola de ½", un acople a la línea de vacío, la cual tiene una válvula de bola de ½" y por último una conexión para termocupla. El aislamiento del tanque está hecho en fibra de vidrio y todo el sistema está hecho en acero inoxidable. [16]

3.2.6. Sistema de vacío

El sistema de vacío tiene como equipo principal la bomba de diafragma, la cual tiene una capacidad de remover hasta 13 L/min y tiene una presión mínima de 0,1 bar, con ménsulas de soporte a la estructura hechas en acero inoxidable. Aguas arriba de la bomba de vacío se puede ubicar una trampa de vacío, esta trampa es un tanque cilíndrico con un serpentín interno de ½”, este se carga con hielo y agua ya que actúa como condensador de los gases condensables, tanto la espiral como el tanque cuentan con una purga inferior en línea de ½” con válvula de bola. Este sistema es fundamental para la remoción de los gases condensables. [16]

3.2.7. Tablero de control

El tablero de control es una unidad de manejo remoto de los hidrómetros, indicadores de temperatura y de presión, y las bombas de solvente y agua. Este sistema cuenta con selector de termopares, una serie de indicadores de temperatura, cuatro botones, los cuales tienen como función la energización del sistema, el encendido del sistema de termopares, el encendido de la bomba de solvente fresco y por último el encendido de la bomba de recirculación de solvente gastado. En el tablero también se cuenta con una parada de emergencia y cuatro bombillos testigos los cuales indican el encendido de las dos bombas mencionadas anteriormente, que hay corriente en la caja eléctrica y que hay corriente en los sensores. [16]

3.2.8. Medidores y controladores

El sistema de medidores y controladores es donde se realiza la regulación manual de los flujos tanto de gas como de solvente, gracias al uso de válvulas de globo y por medio de rotámetros calibrados. A lo largo de la columna de absorción, se mide el perfil de temperaturas en diferentes puntos por medio de termocuplas de tipo J, por otro lado, se cuenta con sensores de presión de alta precisión, los cuales operan de 0 a 4 bar, también se tienen sensores de humedad relativa, tanto en la línea de alimentación, como en la de descarga de a aire. Toda la información concerniente a los sensores se lleva a una serie de “displays” ubicados en el tablero de control. [16]

Figura 10.

Render de la unidad de absorción de gases.



Nota: Se evidencia en la Figura 10 el render de la unidad de absorción de gases presente en el Centro de Purificación y Refinación del CEPIIS. Tomado de Equipo CEPIIS, “Renders Centro de procesos de innovación para la industria sostenible (CEPIIS),” Fundación Universidad de América, 2022. Sin publicar.

Figura 11.

Unidad de absorción de gases.



Nota: Se evidencia en la Figura 11 la unidad de absorción de gases presente en el Centro de Purificación y Refinación del CEPIIS.

4. PARÁMETROS OPERACIONALES Y DE SEGURIDAD DE LAS UNIDADES DE PROCESO

4.1. Parámetros operativos de la unidad de destilación continua

Para realizar adecuadamente la operación de la unidad de destilación, se debe realizar una correcta instalación, por esta razón se mencionan aquellos parámetros de instalación requeridos y sugeridos por el proveedor. Debido a que la unidad tiene una altura de 6 metros y una medida de ancho de aproximadamente 3 metros, se requiere por indicación del proveedor y por seguridad del proceso un área libre de 15 metros cuadrados para su instalación teniendo en cuenta la escalera lateral y el espacio mínimo requerido para operar la torre. En cuanto a los servicios empleados, se debe asegurar un consumo eléctrico normal de 5kW a 220V, en el caso de no considerar calentamiento con vapor, se requerirían 25kW a 220V. [34]

Con respecto al agua de refrigeración, se establece un flujo mínimo de 1 m³/h con una presión de 2 bar, para el vapor de servicio se requiere vapor proveniente de una caldera a presión mínima de 90 psi y un flujo de 25kg/h, por último, se sugiere una suficiente ventilación, donde se garantice la evacuación de vapores producidos en el proceso. [10]

Posterior a la instalación, se debe tener en cuenta los parámetros operativos para llevar a cabo una adecuada validación de la unidad, dichos parámetros son el uso de elementos de seguridad y aseo tales como gafas de seguridad, bata de laboratorio, guantes, botas, señalización, entre otros. Además de lo anterior de deben emplear herramientas tales como una llave expansiva, un balde para recolección de purgas, etc. Los dispositivos de almacenamiento deben estar fabricados en vidrio, ámbar, HDPE o PP.[10]. El equipo cuenta con un total de 177 válvula. Estas se encuentran identificadas con códigos de color con el fin de facilitar su manejo y la identificación como se evidencia en la Tabla 9.

Tabla 9.

Codificación por color de las válvulas presentes en la unidad de destilación continua

Color	Descripción	Numeración de la válvula
	Alimento solvente	1-19 y 40-66

	Alimento reactivo columna	20-39 y 67-95
	Columna de destilación	96-177

Nota: La presente tabla ilustra el rango y el lazo de control respectivo que abarca cada código de color en la unidad de destilación continua. Tomado de: Process Solutions and Equipment, “Manual de Operación. Planta de Destilación Continua,” p. 57, 2018. [11]

4.2. Parámetros de seguridad de la unidad de destilación continua

Se deben tener en cuenta diferentes parámetros de seguridad relacionados con el uso de la unidad de destilación continua, tales como:

- Hacer uso adecuado de los elementos de protección personal, se deben emplear gafas de seguridad, casco, botas de seguridad, bata de laboratorio y guantes resistentes al calor.
- Verificar antes de cada operación la compatibilidad química de las sustancias a emplear con respecto al acero inoxidable 304 y el teflón.
- Se debe realizar un mantenimiento y vigilancia constante a los equipos capaces de operar a presiones y temperaturas altas, estos no pueden contener agujeros, cortes o soldaduras por personal sin calificación.
- El equipo debe funcionar en una zona con libre ventilación para evitar cualquier acumulación de vapores y/o emisiones de solvente, de lo contrario se pueden generar ambientes inflamables o asfixiantes para el personal y los estudiantes.
- Evitar por completo el acceso a las cajas eléctricas del equipo.
- Garantizar el flujo contante de los servicios industriales, el flujo constante de agua fría es fundamental para el correcto funcionamiento de la unidad, si se interrumpe, la operación debe ser suspendida inmediatamente.

- Posteriormente a la operación se deben dejar todos los equipos que componen la unidad de destilación completamente limpios, lavados y secos para evitar corrosión y contaminación cruzada entre los procesos.
- Dado el caso de que se presenten fugas o escapes se deben remediar de manera inmediata, de no ser posible debido a la gravedad del fallo se debe detener la operación.
- En cuanto al almacenamiento de solventes a emplear en la operación se debe realizar en envases diferentes a los colectores de solvente gastado, esto para evitar la contaminación cruzada entre solventes, además es recomendable emplear envases de material inerte para evitar la desnaturalización del solvente.
- Limpiar frecuentemente el equipo para evitar acumulación de polvo y suciedad, se debe mantener aseado la unidad, el área de operación y el tablero de control.

4.3. Parámetros operativos de la unidad de absorción de gases

Para que la unidad de absorción de gases tenga una operación óptima y sin ningún contratiempo, se tienen que realizar una adecuada instalación en sitio, por esta razón se mencionan aquellos parámetros de instalación requeridos y sugeridos por el proveedor.

Debido a que la unidad tiene una altura de 3 metros, se requiere un área libre de 4.5 metros cuadrados para su instalación y una altura de 5 metros. Se debe garantizar un acceso directo al servicio de agua ya que el humidificador opera con agua de proceso a temperatura ambiente y maneja un flujo de 30 L/min, se sugiere que el agua esté libre de dureza, con el fin de evitar futuras incrustaciones, taponamientos y corrosión en el sistema. [16]. Para el agua de refrigeración se tiene como parámetros operativos presión de 1 bar y flujo de 1 m³/h. [34]

Con respecto al aire de proceso, se requiere que este sea proveniente de un compresor a presión mínima de 2 bar con un flujo mínimo de 20 L/min, para el sistema de desagua de purgas de agua y otras purgas que se pueden generar en el proceso se requiere tuberías en gres o PVC de agua caliente 1" mínimo. Para el suministro eléctrico de la unidad de absorción de gases, se debe tener una conexión a tierra tipo de clavija, esta debe tener un voltaje de 110 V, una frecuencia de 60 Hz

y un amperaje de 60 A. Se debe tener en cuenta que el equipo debe ubicarse en un lugar con buena ventilación, ya que en la unidad se generan vapores de varias clases y se debe garantizar su evacuación de forma segura. [16]. Por otro lado, se definen las condiciones de operación con respecto al vapor que ingresa a la unidad, el cual debe tener un flujo de 14 kg/h a una presión de 50 psi. [34]

En términos de requerimientos de operación, se deben tener a la mano una serie de herramientas tales como una llave expansiva, un juego de llaves de tuercas, un recipiente para la recolección de purgas y un embudo, esto para el momento en el cual se va a vaciar el tanque de acumulación de solvente y/o se va a llenar el tanque de solvente fresco. Para una correcta operación y análisis de resultados, se deben tener envases de material inerte para toma de muestras y garrafas o canecas para almacenar el solvente antes y después de la operación de la unidad, además es necesario generar un registro periódico de la información obtenida en la operación, por lo cual se requiere una bitácora de laboratorio y un formato para registro de manejo del equipo [16]. Este se puede evidenciar en el Anexo 10 y Anexo 11 para la unidad de destilación continua y la de absorción de gases respectivamente.

Es de vital importancia para garantizar la salud y seguridad en el trabajo garantizar y exigir a todos aquellos que estén en contacto con la unidad, los elementos de seguridad personal, tales como gafas de seguridad, bata de laboratorio, guantes de carnaza. Por otra parte, se debe tener en el centro de refinación y purificación (CEPURE) un botiquín de primeros auxilios, un extintor y un equipo antiderrame, además las áreas de trabajo, equipos, líneas y rutas de seguridad deben estar debidamente señalizadas con el fin de que todo el personal pueda identificar las mismas en caso de emergencias. [16]

4.4. Parámetros de seguridad de la unidad de absorción de gases

Se deben tener en cuenta diferentes parámetros de seguridad relacionados con el uso de la unidad de absorción de gases, tales como:

- Hacer uso adecuado de los elementos de protección personal, se deben emplear gafas de seguridad, casco, botas de seguridad, bata de laboratorio y guantes resistentes al calor.

- Verificar antes de cada operación la compatibilidad química de las sustancias a emplear con respecto al acero inoxidable 304 y el teflón.
- Para la correcta operación de la unidad se debe contar con dos personas como mínimo para evitar accidentes y relevar las actividades que se puedan presentar.
- El equipo funciona en una zona con libre ventilación para evitar cualquier acumulación de vapores y/o emisiones de solvente, de lo contrario se podrían generar ambientes inflamables o asfixiantes para el personal y los estudiantes. Durante el proceso de instalación de los equipos se realiza la verificación en sitio de las condiciones de ventilación y el edificio cuenta con ventanales desde el segundo hasta el primer piso y se tiene planeado realizar las debidas conexiones para la extracción de vapores al finalizar la construcción del Centro de Procesos.
- Al finalizar la operación se debe esperar que la unidad se enfríe hasta una temperatura de 25° C para descargarlo.
- No permitir que ingrese líquido a la bomba de vacío.
- Dado el caso de que se presenten fugas o escapes se deben remediar de manera inmediata, de no ser posible debido a la gravedad del fallo se debe detener la operación.
- Limpiar frecuentemente el equipo para evitar acumulación de polvo y suciedad, se debe mantener aseado la unidad, el área de operación y el tablero de control.

Cabe resaltar que tanto los parámetros operativos como los de seguridad fueron evaluados y rectificadas en las instalaciones de CEPIIS durante la semana de instalación de los equipos en el mes de septiembre de 2022. En cuanto a los parámetros de área libre, en base a las medidas tomadas en visitas previas con el proveedor, se realizó el cálculo del área total de las unidades y esta se contrastó en sitio de instalación corroborando lo establecido por parte del proveedor. De igual manera, se validó que el edificio contara con los requerimientos mínimos de seguridad y de operación de las unidades tales como el material de las tuberías, la capacidad de agua y vapor de proceso, capacidad de suministro eléctrico y espacio entre las mismas evitando accidentes industriales. Esto de manera previa a la instalación de los equipos en el edificio del CEPIIS.

4.5. Plan operativo y de seguridad en términos de proyección de uso

Las unidades de proceso necesitan constante limpieza, reparación, mantenimiento, vigilancias, repuestos, inspecciones, entre otros procesos fundamentales para el adecuado funcionamiento de estas, por esta razón es fundamental realizar un plan operativo teniendo en cuenta elementos de seguridad de modo que se asegure un funcionamiento óptimo de las unidades de destilación y de absorción presentes en la zona CEPURE

Considerando la cantidad de instrumentos de medición pertenecientes a cada una de las unidades objeto del presente estudio se deben realizar revisiones de todos los equipos de la planta en periodos de tiempo establecidos. Teniendo en cuenta que el Centro de Procesos no opera de manera continua, es recomendable realizar revisiones semanales dependiendo el uso que se le a las unidades, adicionalmente en cuanto al mantenimiento es recomendable realizarlo de manera trimestral. A continuación, se realiza una descripción por cada uno de los equipos presentes en las unidades.

En el caso de los intercambiadores de calor se debe realizar un control e inspección durante las paradas de la planta y siempre que se aprecie pérdida de presión o una reducción de la capacidad de trabajo. Los intercambiadores deben ser limpiados cada tres meses debido a que un ensuciamiento excesivo en los tubos afecta la eficiencia, los procedimientos de limpieza se pueden realizar:

1. Por medio de circulación de aceite caliente a alta velocidad.
2. Por medio de circulación de agua caliente limpia por la carcasa o por los tubos para eliminación de depósitos.
3. Cepillos de forma helicoidal para extracción de incrustaciones presentes en los tubos.
4. Realizar la limpieza por agua a alta presión.
5. Emplear el solvente sugerido por el proveedor del equipo los cuales son más efectivos debido a que se tiene en cuenta el tipo de suciedad que se puede generar de acuerdo con las sustancias capaces de emplear y al material de fabricación.

Adicionalmente se debe verificar la inexistencia de bolsas de aire o gas presentes o atrapados en los tubos, además de realizar una inspección visual de forma externa e interna, en donde se verifique la existencia de corrosión, agrietamiento y estado de las soldaduras.

En el caso de las válvulas empleadas, la mayoría válvulas de globo, se debe realizar un desmontaje de la válvula en el cual simultáneamente se realiza una comprobación del estado estructural y operativo de cada una de las partes, evaluar la presencia de corrosión, agrietamiento, fugas, entre otros. Se debe realizar la limpieza correspondiente y si es el caso solicitar los repuestos o reparaciones necesarias para realizar el montaje nuevamente.

Adicionalmente en el caso de las bombas se debe realizar un correcto mantenimiento, inicialmente se debe asegurar que la alimentación este desconectada, que todas las válvulas de presión se encuentren cerradas y la presión haya sido liberada. Para realizar un mantenimiento preventivo se deben identificar previamente diferentes signos tales como el posible deterioro de los sellos, la presencia de fugas, polvo, entre otros, de esta manera tomar medidas preventivas previas a la operación de las unidades.

Se debe hacer pasar agua u otra solución neutralizante, se realiza el procedimiento estándar para remoción del diafragma de la bomba para su inspección de modo que se identifique desgaste o condiciones desfavorables que afecten el funcionamiento. Se puede dar casos en donde se necesite reemplazo de diafragma de la bomba o reemplazos de válvulas, en este caso, se debe realizar limpieza, verificación, aplicación de sustancias permitidas para engrase, atornillado y validación del funcionamiento del equipo en conjunto.

Por otro lado, y teniendo en cuenta los instrumentos de medición de temperatura o termopares presentes en ambas unidades de proceso se debe considerar el requerimiento de calibraciones constantes, al igual que el proceso de limpieza, este último se debe realizar de forma mensual. Los termopares tipo J y K no deben ser contaminados con aceite, grasa o solventes

Cabe aclarar que antes del desmontaje de cualquier equipo se debe asegurar que la unidad ha sido debidamente despresurizada, drenada y purgada de cualquier material.

Puntualmente, en el caso de la columna de destilación, el mantenimiento de esta se debe realizar en paro de planta debido a que el mantenimiento e inspección a realizar se realiza de forma interna. Inicialmente se debe realizar un lavado de la columna de modo que se elimine cualquier residuo o depósito. Posteriormente se realiza neutralización química, comúnmente se realiza una purga con gases inertes, es fundamental realizar los debidos procesos de parada y lavado de acuerdo con lo indicado por el proveedor.

Luego se espera a que la temperatura disminuya realizando un constante control de dicha variable, y se procede a verificar la uniones, soldaduras y estado de platos, entradas, conexiones, ensamblaje, entre otros.

El mantenimiento de una columna de destilación tarda horas debido a que se debe realizar un acondicionamiento para la inspección, cambios o reparaciones, verificación posterior a los cambios y puesta en marcha. Cabe aclarar que los tiempos varían aproximadamente y sin tener en cuenta daños graves a la estructura entre 10 a 18 horas. Se recomienda realizar este proceso mínimo 3 veces al año

Siempre se debe tener en cuenta las fichas técnicas de las sustancias empleadas antes de la parada de la columna al igual que las empleadas durante dicho proceso, de manera que se tenga conocimiento sobre las especificaciones técnicas y de seguridad en caso de posibles accidentes.

Para cada uno de los equipos presentes se debe realizar una inspección completa, esta requiere del apagado de la unidad para acceder a los componentes internos, realizar pruebas de presión y limpieza de estos elementos. En estas inspecciones se busca suciedad, corrosión o daños presentes en los equipos y conforme a lo reportado tomar acciones correctivas para evitar que esto se siga prolongando en el tiempo y afecte a largo plazo la operatividad de la unidad.

El deterioro se puede presentar por ciertas causas, tales como la corrosión general, la corrosión intergranular, el agrietamiento por tensión, la corrosión galvánica, el impacto, el ataque por erosión y la falta de un programa formal de mantenimiento e inspección. Por estas razones se realiza las inspecciones periódicas y asimismo identificar si estos factores están presentes y buscar las maneras de mitigarlos.

En la torre de absorción se debe hacer un mantenimiento predictivo el cual se basa en revisiones periódicas del ventilador, las bombas, el sistema de alimentación de solvente fresco, las tuberías y el distribuidor de líquido durante la operación de la unidad. Lo más usual es que el empaque ceda su naturaleza rígida nunca requiera de una limpieza durante su vida útil, esta premisa se cumple siempre y cuando este haya sido diseñado y opere de manera correcta, sin embargo, elementos solidos como cristales o sales pueden acumularse en el empaque y esto requiere de una limpieza para que no interfiera con la operación de la torre.

Usualmente la eliminación de estos se puede realizar mediante una recirculación de una solución química en la cual los sólidos se disuelvan o reaccionen, cabe resaltar que este tratamiento no siempre elimina la acumulación, por lo que se debe recurrir al uso de agua a alta presión, agua caliente o vapor atmosférico. Antes de usar cualquier producto químico se debe retirar el medio del empaque para limpiarlo profundamente y consultar con el proveedor la resistencia de este.

El separador de arrastre debe enjuagarse periódicamente con rociadores para evitar la acumulación de sustancias y eventualmente un taponamiento en el equipo. Los intervalos entre los lavados de rutina son determinados mediante el uso que se le dé al mismo y con base en las condiciones de las operaciones que se llevan a cabo en el mismo.

Es necesario llevar una lista de verificación de mantenimiento, con el fin de poder garantizar el funcionamiento óptimo de las unidades y asimismo evitar problemas inesperados en el sistema de absorción. Por lo cual, los intervalos entre las limpiezas periódicas se pautan mediante las condiciones de funcionamiento específicas del sistema.

Otro factor importante para considerar es el mantenimiento periódico de los filtros ubicados en la tubería de reciclaje de solvente y la bomba de este lazo. Esto con el fin de evitar una parada total del sistema de absorción a causa de taponamientos en estos.

En cuanto al intercambiador de calor presente en el tanque recuperador de solvente se deben inspeccionar de manera visual las partes internas y externas de los tubos que sean accesibles, aquí se busca identificar si presentan suciedad, corrosión y/o daños teniendo en cuenta el deterioro del material de construcción principalmente del serpentín. Esto garantiza la integridad mecánica de la unidad y un nivel de rendimiento congruente a los parámetros iniciales planteados en el diseño.

El ensuciamiento de los intercambiadores ocurre por la deposición de material extraño en el interior o exterior de los tubos. Esto se ve reflejado durante la operación por medio del aumento en la caída de presión y una disminución general en el rendimiento del equipo. Si no se realiza una limpieza periódicamente se pueden llegar a obstruir completamente los tubos generando tensiones térmicas y daños en el mecanismo del equipo.

El humidificador de agua requiere de una serie de inspecciones mencionadas anteriormente con el fin de verificar el funcionamiento y garantizar que no hay presencia de suciedad y corrosión en el equipo. Se pueden presentar obstrucciones o incrustaciones en las tuberías por lo que se requiere de una limpieza constante, los rociadores pueden presentar fugas o daños a nivel mecánica por lo que, según la operación que se realice se debe monitorear y rectificar su funcionamiento como medida del mantenimiento predictivo.

Se debe realizar inspecciones de manera regular donde las unidades se encuentre en funcionamiento para identificar ciertas fallas tales como perturbaciones vibratorias, uniones con juntas que posean fugas, caída de presión excesiva, disminución de la eficiencia térmica de calor la cual se determina mediante la temperatura de salida del gas o líquido, tasas de condensación más bajas y entremezclado de fluidos. Los factores anteriormente mencionados son signos de que se requiere un mantenimiento exhaustivo o un proceso de inspección más constante.

El caudal y la temperatura del vapor y/o líquido se debe comprobar regularmente para asegurar que concuerda a la estipulada en el diseño y cumple con los criterios de rendimiento. La disminución del rendimiento debido al ensuciamiento se manifiesta por medio de una disminución gradual de la eficiencia, al igual que las fallas mecánicas las cuales conducen a una incapacidad total o parcial de la unidad para funcionar.

Por último, para mejorar el funcionamiento y rendimiento de los equipos se debe minimizar cualquier caída de presión en la línea de vapor aguas arriba. La ventilación adecuada y constante de los equipos junto con las juntas selladas a prueba de fugas en los sistemas de vacío son necesarias para evitar la acumulación de gas y la alteración de cualquier equilibrio de condensación. Las recomendaciones para alargar la vida útil de las unidades se evidencian en el Anexo 9.

5. EVALUACIÓN OPERATIVA Y ESTRUCTURAL DE LAS UNIDADES EN EL PROCESO DE INSTALACIÓN

Previamente al proceso de puesta en marcha debe realizarse la instalación de los equipos correspondientes a la unidad de absorción de gases y la unidad de destilación continua. Este proceso se llevó a cabo en un período de una semana comprendida entre el miércoles 18 de agosto y el jueves 25 de agosto del año 2022, donde se hizo uso de equipos de transporte tales como un camión grúa evidenciado en la Figura 12. y una grúa tipo cangrejo en la Figura 13 para poder realizar el traslado e izaje de los equipos ubicados en el parqueadero de estudiantes hacia la cancha multiservicios de la sede de los Cerros de la Universidad de América, al finalizar esta acción se realizó el izaje de cada una de las unidades y estructuras dentro del edificio del Centro de Procesos para la Innovación y la Industria Sostenible (CEPIIS).

Figura 12.

Camión grúa.



Nota: Se evidencia en la Figura 12 un camión grúa, el cual fue usado para el transporte de las unidades desde el parqueadero de estudiantes hacía la cancha multiservicios.

Figura 13.

Grúa tipo cangrejo



Nota: Se aprecia en la Figura 13 la grúa tipo cangrejo empleada para el izaje de los equipos al edificio del CEPIIS.

Se programó la entrada del camión grúa para concluir con el ingreso de todos los equipos y componentes de las unidades que componen el Centro de Procesos y la grúa tipo cangrejo para el izaje en las horas de la mañana con el fin de contar con el día completo para realizar operaciones de traslado y ensamblaje. Se presentaron diferentes retrasos por parte de la llegada de la grúa debido al alto tráfico de la ciudad de Bogotá tráfico, de igual manera en el ingreso al área de Multiservicios del Eco Campus debido a que el camino se encontraba húmedo por las lloviznas ocasionales que se presentaban.

Figura 14.

Izaje y transporte de la unidad de destilación.



Nota: Se evidencia en la Figura 14 el izaje del tercer piso, este corresponde a la unidad de destilación continua, con el fin de poder realizar su respectiva instalación y ensamblaje dentro del edificio.

Figura 15.

Izaje y transporte de la unidad de absorción de gases.



Nota: Se aprecia en la Figura 15 el izaje de la estructura correspondiente a la unidad de absorción de gases para poder realizar su respectiva instalación dentro del edificio.

Con la maquinaria instalada en sitio se pudo dar inicio al transporte de los equipos dentro del edificio del CEPIIS, cada uno de estos traslados se demoró aproximadamente 1 hora debido a que se debía planear muy bien y estar en constante comunicación con el equipo de expertos de Transgrúas con el fin de que los equipos entraran en el lugar exacto donde se requerían de modo que se facilitara su ensamblaje.

Figura 16.

Estructura de la unidad de destilación continua.



Nota: Se evidencia en la Figura 16 la estructura armada y ensamblada de la unidad de destilación continua dentro del edificio del CEPIIS.

Durante el proceso de instalación e izaje de cada uno de los equipos y componentes de las unidades objeto de estudio se realizó una supervisión y evaluación estructural de los mismos, ya que durante el transporte y la instalación se pueden presentar daños tales como rupturas en la estructura, averías, daño en las ruedas de soporte de la unidad e inconsistencias en cuanto a la parte estructural de los equipos. Estos daños a nivel estructural pueden influir en la eficiencia y función de estos, por esta razón se debe realizar una evaluación posterior a la instalación y ensamblaje completo de cada uno de los equipos de forma que se verifique la magnitud de la afectación al funcionamiento de las unidades.

Figura 17.

Daño en la estructura de la unidad de destilación continua.



Nota: En la Figura 17 se puede evidenciar un daño en la estructura perteneciente al tercer piso de la unidad de destilación continua.

Figura 18.

Daño en la estructura de absorción de gases



Nota: En la Figura 18 se puede evidenciar un daño en la estructura perteneciente al segundo piso de la unidad de absorción de gases.

Como se evidenció en la Figura 17 y 18 algunas piezas correspondientes a la estructura de la unidad de destilación continua y absorción de gases respectivamente presentaron daños durante el transporte y el izaje. Estos daños no comprometen el funcionamiento de las unidades ya que corresponden a barandas y bordes que no influyen directamente sobre la estructura de las unidades. Sin embargo, la falta de estas puede ocasionar un accidente o un incidente dentro del Centro de Procesos, por lo cual es de suma importancia realizar el mantenimiento de estas para prevenir cualquier acción indeseada. Adicionalmente cabe resaltar que el cambio de estas piezas no incurre en gastos significativos ya que son piezas muy comunes, fáciles de conseguir y económicas en el mercado.

Por consiguiente, el proceso de puesta en marcha para las unidades de destilación continua y la unidad de absorción de gases debe ser coordinado entre las empresas encargadas de la construcción y el CEPIIS, además del apoyo y supervisión de los contratistas y demás asistentes al proceso. Como se mencionó anteriormente es un proceso gradual, el cual inicia con la comprobación de los sistemas y equipos y posteriormente el funcionamiento en sí de cada una de las plantas del Centro de Purificación y Refinación.

Antes de que se termine la obra del Centro de Procesos de la Universidad es necesario tener el plan de la puesta en marcha de la planta bastante detallado con el fin de que cuando la construcción se encuentre finalizada se asignen las tareas correspondientes a cada uno de los trabajadores y así optimizar los recursos disponibles coordinando las actividades para cumplir los plazos que se hayan establecido. En el programa de puesta en marcha deben estar establecidas las actividades en el orden que serán realizadas con fechas específicas y la designación del personal que debe ejecutarlas.

Lo esencial en la puesta en marcha de las unidades es la definición de la secuencia a seguir, para esto se necesita realizar una planificación en donde se incorporen los distintos elementos de las unidades en el orden lógico en el que son requeridos para que el proceso corra de manera correcta. Antes de iniciar la puesta en marcha de la unidad, los servicios auxiliares deben estar disponibles, por esta razón, los sistemas de agua de enfriamiento, sistemas de vapor y los sistemas eléctricos se deben poner en marcha antes que los equipos principales, cabe aclarar que incluso este proceso debe tener un orden lógico.

Posteriormente se procede con el proceso de puesta en marcha mediante la operación de las unidades de destilación y absorción con sustancias seguras y en pequeñas cantidades, durante el proceso se aumenta gradualmente la capacidad de cada sección hasta alcanzar las condiciones de operación normales de cada unidad.

Previamente a comenzar con las pruebas se debe realizar una serie de planes para tratar todas las emergencias que se puedan presentar incluyendo las posibles paradas de emergencia, por lo que se deben utilizar combinaciones de alarmas de distintos tipos para identificar y advertir de los diferentes tipos de emergencias. De igual manera todo el equipo humano que se encuentre relacionado con la planta debe estar entrenado mediante una serie de simulacros para que identifiquen las acciones a tomar en ese momento, mientras que el equipo y suministros de apoyo deben estar disponibles de forma inmediata en caso de un accidente.

Las pruebas para realizar son, pruebas en caliente, pruebas con fluidos seguros, pruebas con disolventes, puesta en marcha inicial y los procedimientos de permisos de trabajo. A continuación, se evidencia un consolidado de los equipos, tipos de pruebas, acciones a realizar y aspectos para tener en cuenta para realizar la puesta en marcha correctamente

Tabla 10.

Plan de puesta en marcha de los equipos presentes en las unidades de absorción y destilación

Equipo	Tipo de prueba	Acciones por realizar	Observaciones
Tanques de almacenamiento	Prueba hidrostática	Desacoplamiento de los tanques de almacenamiento Comprobar el estado de los tanques - Inspección visual Inyectar aire a una presión de 15 psi para probar las soldaduras y posteriormente con agua	El llenado con agua debe realizarse 50mm por encima de la capacidad del tanque

Tuberías	Prueba hidrostática	Se conectan tubos y tanques y se sellan escapes de los tubos Se realiza inyección de aire	Es posible realizar las pruebas adicionales con agua y jabón para identificar fácilmente las fugas
Bomba	Prueba en agua	Inicialmente se debe tener un correcto funcionamiento de las partes mecánicas que la conectan Se realiza inyección de agua para verificación del funcionamiento	Verificación con el proveedor del arranque y limitaciones del motor
Intercambiadores de calor	Verificación de temperatura del fluido de prueba	Se realiza el llenado del intercambiador con la sustancia especificada por el proveedor Configuración de los setpoints de prueba	Previamente tener claro: Setpoints de prueba, tipo de líquido a usar, presión de bombeo interno
Válvulas	Verificación visual y funcional	Visualizar el sellado hermético Verificar fugas, ajustar y verificar el sistema libre de goteos	Se permite la posición correcta de la válvula para circular agua para la prueba
Sensores de temperatura	Baño seco	Se realiza una prueba con un elemento llamado baño seco el cual calienta y enfría de forma rápida para verificación de las lecturas de los sensores	Se realiza la comparación de los valores con lo evidenciado a través del PLC

Nota: Se evidencia en la tabla las acciones a realizar para poder ejecutar la puesta en marcha de cada uno de los equipos presentes en las unidades objeto de ensayo del presente proyecto, de forma que sean tenidas en cuenta en el momento de realizarlo en sitio. Tomado de: E. F. Barba Avila, “Pre-comisionamiento y Comisionamiento del Prototipo de la Planta de Destilación construida en la Universidad Pontificia Bolivariana,” Universidad Pontificia Bolivariana, 2019 [35]. Se evidencia el plan de puesta en marcha de las unidades en el Anexo 6.

6. VALIDACIÓN DE LOS EQUIPOS

6.1. Validación de la unidad de destilación continua

Para realizar la validación de la unidad se deben tener en cuentas diferentes requerimientos de seguridad, tales como usar los elementos de protección personal, informar a las personas en sitio el inicio de operación del equipo, mantener la ventilación, garantizar el flujo constante de agua fría y asegurar que el proceso de puesta en marcha haya finalizado y todos los sistemas se encuentren en buen estado. Ver plan de validación de la unidad de destilación continua en formato infografía en el Anexo 7 y el formato detallado en el Anexo 13.

Inicialmente se debe revisar la limpieza de la columna de destilación, los tanques, el rehervidor, intercambiadores, visores e indicadores, posteriormente se purga la columna, tanques, líneas de proceso, rehervidor e intercambiadores para verificar que se encuentren limpios y sin bloqueos. Por consiguiente, se deben preparar las soluciones a destilar, esto de acuerdo con el tipo de destilación que se vaya a realizar y se verifica la disponibilidad de los servicios auxiliares, tales como el flujo de agua de refrigeración, vapor de proceso y corriente eléctrica.

La selección de configuración de trabajo es fundamental debido a que es la selección del experimento a realizar en la unidad de destilación continua, para esto se consideran diferentes parámetros tales como el tiempo de preparación, el tiempo disponible para realizar la práctica, el número de estudiantes u operarios disponibles y el tiempo de estabilización de la unidad. Dicha selección se realiza en el tablero de control, en donde se elige entre funciones independientes y las opciones de operación, inicialmente se eligen las funciones independientes en donde, se deben calibrar los rotámetros y se debe llenar el rehervidor y posteriormente en las opciones de operación se selecciona el tipo de experimento.

La calibración de los cuatro rotámetros de la unidad se realiza por comparación indirecta del caudal indicado por el instrumento, respecto al valor de referencia. Este último es calculado mediante la medición del volumen del fluido recolectado en un tiempo determinado. Para dicha calibración se debe ingresar a la pantalla de inicio en el tablero de control y elegir la opción funciones independientes y calibración de rotámetros, existe un rotámetro en la bomba de solvente, uno en la bomba de alimento y dos en la bomba de reflujo.

Con respecto al llenado del rehervidor, este proceso se realiza abriendo la línea entre el tanque de alimentación y encendido de la bomba desde la pantalla de operación en la opción funciones independientes y carga del rehervidor. Posteriormente para la selección de operación existen tres opciones de operación principales, las cuales son, destilación simple, destilación batch y destilación continua, de la última se elige entre convencional, azeotrópica y extractiva.

Por último, se realiza la carga del sistema, en donde se prepara la solución de alimentación, la cual se carga en el tanque correspondiente, si se realiza una destilación simple o tipo batch, la solución que se alimenta es la que se desea destilar, si se va a realizar una destilación continua, dicha solución debe tener una composición similar a la composición de fondos que se espera conseguir. Se procede a posicionar las válvulas del tanque, el rotámetro, el precalentador, entre otros, dependiendo de su función. Posteriormente se enciende la bomba de alimentación del reactivo, esta última debe apagarse una vez se haya llenado el rehervidor.

Una vez finalizado el proceso, en el caso de la destilación simple, se debe detener el ingreso de vapor al rehervidor y permitir el flujo de agua de enfriamiento en el condensador, cuando no haya más flujo de destilado, se detiene el paso del agua, se vacían los tanques colectores e inicia el proceso de purgas. En la destilación batch, se debe detener el ingreso de vapor al rehervidor y del destilado hacia el enfriador, de esta manera se permite el flujo de destilado al tanque de acumulación de reflujo, de la misma forma, se permite el flujo de agua de enfriamiento en el condensador hasta que no se observe formación de condensado y por último se realiza el proceso de vaciado de tanques y purga.

En el caso de una destilación continua de tipo convencional, extractiva o azeotrópica, se detiene el ingreso de vapor al precalentador, se detiene la bomba de alimentación a la torre de destilación, se detiene el ingreso de vapor al rehervidor y se hace el debido cierre de las válvulas necesarias, posteriormente se permite el flujo de agua de enfriamiento en el condensador y se realiza el proceso de vaciado de tanques y purga.

6.2. Validación de la unidad de absorción de gases

Para realizar la validación de la unidad de absorción de gases se deben tener en cuenta y garantizar diferentes requerimientos de seguridad, tales como usar los elementos de protección personal,

informar a las personas en sitio el inicio de operación del equipo, mantener la ventilación, mantener unos elementos tales como un botiquín y un extintor de incendios cerca al lugar de operación, además verificar el buen estado de los equipos al finalizar el proceso. Ver plan de validación de la unidad de absorción de gases en formato infografía en el Anexo 8 y el formato detallado en el Anexo 14.

En primera instancia se debe verificar que todos los componentes de la unidad se encuentren limpios en su totalidad, en caso de que se acumule material por el escurrimiento de material residual en las paredes de la columna principalmente, sin embargo, de igual manera se verifica que los tanques de almacenamiento se encuentren en igualdad de condiciones. Posteriormente se purgan los tanques y las válvulas para verificar que estén limpias y sin bloqueos que impidan su funcionamiento, además se identifica el estado de las válvulas de purga y de alivio ya que estas deben estar cerradas.

Evaluar previamente la compatibilidad química de las sustancias que se van a utilizar en el proceso es fundamental para garantizar el buen estado de los equipos a largo plazo, debido a que existen sustancias químicas las cuales pueden generar corrosión en los materiales de construcción de los equipos y sus accesorios con base en la baja compatibilidad que poseen. Por esta razón el usuario debe tener en cuenta la tabla suministrada por medio del manual de usuario de la unidad de absorción de gases donde se registran los datos de compatibilidad química de ciertas sustancias con respecto al acero inoxidable 304 y el teflón los cuales constituyen los materiales de construcción de la unidad.

El control de temperatura se realiza por medio de una serie de termocuplas las cuales registran la temperatura del extractor, la del concentrador, la temperatura de entrada y de salida del condensado. Para cada proceso existe una serie de temperaturas de referencia con las cuales se va a basar la operación de todo el sistema, debido a que si se generan ciertos cambios con respecto a las temperaturas de referencias registrada el sistema de control emitirá una serie advertencias con el fin de que el operador conozca el estado actual del sistema y genere una solución para el mismo.

Para iniciar la operación en la unidad de absorción se debe cargar el tanque de alimentación de solvente verificando que esté lleno al 80% de su capacidad ya que no se debe sobrepasar dicho

límite mientras se ubican las válvulas en su posición correspondiente para evitar derrames durante el proceso. En el sistema de humidificación se carga el humidificador con el compuesto que será absorbido al 80% de su capacidad verificando el estado de las válvulas y los rotámetros para evitar derrames o un incremento de presión en el sistema, de igual manera se enciende el compresor y se mantienen estas condiciones hasta que la medición registrada por el higrómetro en la corriente de aire húmedo permanezca constante.

En la columna de absorción se deben verificar los estados de cada una de las válvulas para que el proceso transcurra con normalidad sin fugas, se permite que el sistema se estabilice durante 30 minutos como mínimo y posterior a esto se realiza el registro de caudal de aire y de solvente, y la presión de la columna en intervalos de tiempos definidos, finalmente se realiza un muestreo de líquido de la columna abriendo una de las válvulas de muestreo para extraer la cantidad de muestra necesaria según el método de análisis.

Finalmente, para realizar la parada del proceso, como primera acción se debe apagar el compresor, se dejan pasar unos minutos para apagar la bomba de alimentación de solvente desde el tablero de control y se deja salir el solvente húmedo por medio de la válvula correspondiente hasta que se desocupe la columna. Para recuperar el solvente se verifica el estado de las válvulas para garantizar que el proceso se lleve a cabo, seguido a esto se llena la trampa de vacío con hielo para retener los vapores del solvente con el fin de proteger la bomba de vacío y se enciende la bomba de vacío, la operación se debe mantener hasta alcanzar la pureza de solvente que se desea, cuando se logra el objetivo de pureza se apaga la bomba de vacío y se enciende la bomba de retorno de solvente hasta que el tanque de solvente fresco se llene máximo hasta el 80% de su capacidad. Como último paso se realiza el lavo correspondiente de cada uno de los equipos con el fin de que otro proceso no se vea contaminado por sustancias ajenas al mismo generando resultados no deseados.

6.3. Simulación en nivel de ingeniería conceptual

Para realizar el análisis práctico y la validación del proceso de las unidades presentes en la zona CEPURE se realiza la simulación a nivel de ingeniería conceptual de los diferentes experimentos teniendo en cuenta la proyección de uso de las unidades de destilación continua y de absorción de gases. Las respectivas simulaciones se realizan en el programa Aspen Plus (Advanced System for

Process Engineering) el cual es un software de simulación de procesos líder en la industria química [36]. En este se realiza un modelado de cada uno de los procesos, estimación de costos y administración de recursos con el fin de realizar un análisis de sensibilidad de las variables criterio y optimizar el funcionamiento de cada uno de los equipos que conforman las unidades de proceso objeto de estudio del presente proyecto.

Las simulaciones de los procesos de absorción y destilación en nivel de ingeniería conceptual se realizan con el objetivo de que se evidencien los posibles resultados y problemáticas que se presentaran en el momento en el que las unidades se encuentren en funcionamiento. Se realizan diseños preliminares de los experimentos más comunes en la industria, es importante mencionar que los resultados pueden variar en su naturaleza con respecto a los resultados reales debido a que se abarcan diferentes alcances y condiciones por el nivel de detalle estudiado y aplicado en el presente proyecto, no obstante, las simulaciones representan a cabalidad lo que es un proceso factible de ingeniería aplicable a la planta piloto de la Universidad de América.

6.3.1. Simulación de la unidad de destilación continua

Teniendo en cuenta las configuraciones de trabajo que posee la unidad de destilación continua se realizan diferentes simulaciones de modo que sea posible realizar un análisis a nivel de ingeniería conceptual de las diferencias en cuenta a eficiencias, condiciones de operación, cantidad de materia prima, consumo energético y consumo de servicios auxiliares.

Con base a lo establecido en el capítulo 3, numeral 3.1, la unidad de destilación continua está compuesta por diferentes equipos, para la simulación se realiza el modelamiento de los equipos principales tales como bombas, intercambiadores, rehervidor, condensador y la columna de destilación. Se tienen en cuenta las condiciones de operación dadas por el proveedor, las cuales se evidencian en la Tabla 11.

Tabla 11.

Especificaciones de operación de la unidad de destilación continúa dadas por el proveedor

Condición de operación	Magnitud	Unidad
Capacidad de los tanques	50	L
Flujo del agua de refrigeración mínima	1	m ³ /h
Presión del agua de refrigeración mínima	2	bar
Presión de vapor	90	psi
Flujo de vapor	25	kg/h

Nota: Se evidencian las especificaciones de operación correspondientes a los servicios auxiliares y características para tener en cuenta para la operación de la unidad de destilación continua. Tomado de: Process Solutions and Equipment, “Manual de Operación. Planta de Destilación Continua,” p. 57, 2018 [11]

-Destilación normal

En el caso de la configuración de trabajo como destilación normal se realiza uno de los experimentos estipulados en la Tabla 4. Tipos de experimentos de la unidad de destilación continua el cual consiste en una mezcla problema compuesta por etanol y agua a una composición del 50%, a temperatura ambiente de 20°C y a una presión de 1 bar. Se cuenta con una alimentación de 20 L/h teniendo en cuenta la capacidad del tanque de almacenamiento de la mezcla problema.

Teniendo en cuenta las sustancias a utilizar en el experimento se hizo uso del modelo termodinámico UNIFAC, ya que las sustancias, son polares, no poseen electrolitos, además la presión de entrada al sistema no es mayor a los 10 bar y es un modelo comúnmente empleado para evaluar los coeficientes de actividad en mezclas líquidas. Esto de acuerdo con los árboles de decisión planteados por Eric C. Carlson. [37]

Posteriormente se hace uso de una bomba (P-101) para facilitar el transporte de la mezcla problema la cual se encuentra a una presión de 2 bar, posteriormente ingresa a un intercambiador de calor de coraza y tubos (HE-102) que funciona a contracorriente en el cual se especifica que la

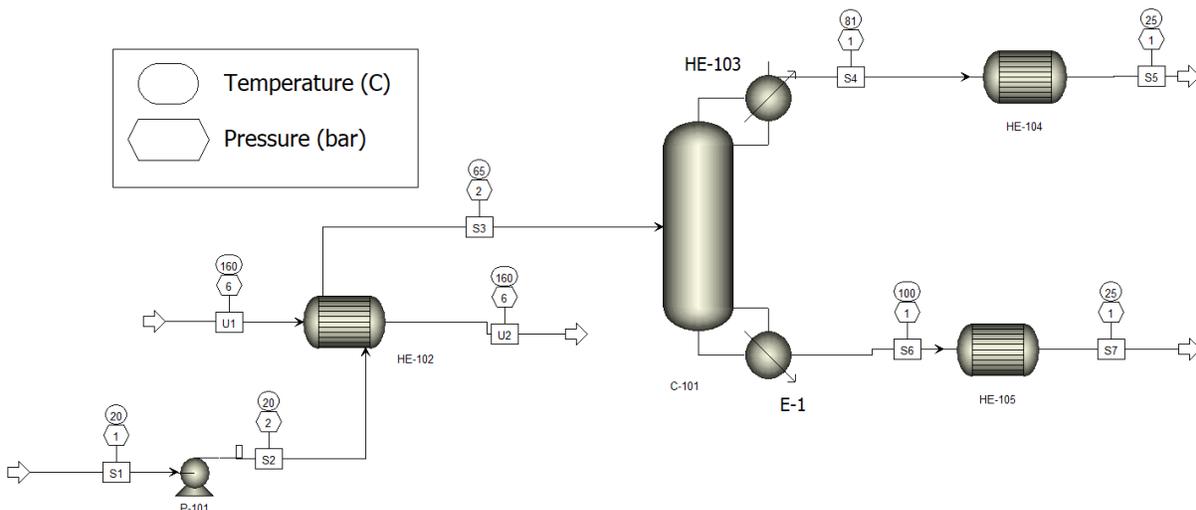
temperatura de salida debe ser 65°C la cual es cercana a la temperatura de ebullición del etanol, cabe aclarar que se hace uso de vapor como servicio de calentamiento a una presión de 90 psi y un flujo de 25 kg/h como establece el proveedor y como se indica en la Tabla 10.

Por consiguiente, ingresa a la torre (C-101) la cual cuenta con 6 etapas, se realiza la alimentación en la etapa 3 y se especifica una tasa de reflujo de 1,5 y un condensador de tipo parcial a una presión de 1,5 bar y el rehervidor a una presión de 0,5 bar. Se configuró la torre de destilación para realizar 60 iteraciones con el fin de obtener resultados más cercanos a la realidad.

Para este caso se configuró la torre de destilación para realizar un total de 25 iteraciones debido a que el sistema presenta resultados exactos en cuanto a la convergencia con el número base de iteraciones propuestas por Aspen Plus. Con dicha configuración de trabajo descrita previamente se analiza la destilación normal. A continuación, en la Figura 19 se evidencia la simulación realizada.

Figura 19.

Simulación correspondiente a la destilación normal



Nota: Se evidencia la pantalla principal de la simulación realizada correspondiente a la configuración de trabajo destilación normal, en donde se evidencian la temperatura y la presión de cada corriente.

De las variables estipuladas en la simulación es fundamental realizar un análisis de sensibilidad de las más importantes, es decir, aquellas que lleguen a afectar el funcionamiento de la columna y que afecten directa o indirectamente la composición de los productos obtenidos. Estas variables son el flujo de alimentación de la mezcla problema, las presiones de ingreso a la columna al igual que las correspondientes del condensador y el rehervidor, la etapa de alimentación y a la razón de reflujo. Este análisis se realiza en el Capítulo 4 “Análisis de la información de validación”.

Por último, en la Tabla 12 se evidencia un consolidado de las condiciones de operación y composiciones de cada una de las corrientes en donde se pueden evidenciar los productos obtenidos y sus características.

Tabla 12.*Resultados de la simulación correspondiente a la destilación normal*

Corriente	Unidades	S1	S2	S3	S4	S5
Desde			P-101	HE-102	C-101	HE-104
Para		P-101	HE-102	C-101	HE-104	
Fase		Líquida	Líquida	Líquida	Vapor	Líquida
Temperatura	C	20,00	20,09	65,00	80,67	25,00
Presión	bar	1,00	2,00	2,00	1,00	1,00
Fracción másica de vapor		0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
Fracción másica de líquido		1,00	1,00	1,00	0,00	1,00
Flujos másicos	kg/hr	17,88	17,88	17,88	11,29	11,29
AGUA	kg/hr	8,94	8,94	8,94	2,35	2,35
ETANOL	kg/hr	8,94	8,94	8,94	8,93	8,93
Fracciones másicas						
AGUA		0,50	0,50	0,50	0,21	0,21
ETANOL		0,5	0,50	0,50	0,79	0,79
Flujos volumétricos	l/hr	20,00	20,00	21,21	13,82	13,52

Corriente	Unidades	S6	S7	U1	U2
Desde		C-101	HE-105		HE-102
Para		HE-105		HE-102	
Fase		Líquido	Líquido	Vapor	
Temperatura	C	99,63	25,00	160,24	160,24
Presión	bar	1,00	1,00	6,21	6,21

Fracción másica de vapor		0,00	0,00	1,00	0,95
Fracción másica de líquido		1,00	1,00	0,00	0,05
Flujos másicos	kg/hr	6,59	6,59	25,00	25,00
AGUA	kg/hr	6,59	6,59	25,00	25,00
ETANOL	kg/hr	0,00	0,00	0,00	0,00
Fracciones másicas					
AGUA		0,99	0,99	1,00	1,00
ETANOL		9,8E-5	9,8E-5	0,00	0,00
Flujos volumétricos	l/hr	7,17	6,63	7817,54	7395,24

Nota: Se evidencia la tabla resumen de las condiciones ingresadas de las corrientes que componen el proceso de etanol y agua al 50% y las composiciones obtenidas de los productos finales. Ver Anexo 1.

En la Tabla anterior se evidencian las condiciones y composiciones de las corrientes de los productos finales, las cuales son S4 y S5 por cimbras y S6 y S7 por fondos. Se evidencia que la corriente de entrada la cual tenía una composición del 50% de etanol, sale por cimbras con una composición de etanol del 77% y por fondos sale un 99% agua, lo que indica que la separación se realizó favorablemente.

-Destilación extractiva

En el caso de la configuración de trabajo como destilación extractiva se realiza uno de los experimentos estipulados en la Tabla 4. Tipos de experimentos de la unidad de destilación extractiva el cual consiste en una mezcla problema compuesta por etanol y agua, a una composición de 80% etanol y 20% agua, la cual ingresa a una temperatura de 20°C, a una presión de 1 bar y con un flujo de 25 L/min, esto teniendo en cuenta la capacidad del tanque de almacenamiento de la mezcla problema

Se hace uso de etilenglicol como solvente el cual ingresa a 20°C, a 1 bar y con un flujo de 20 L/min, esto teniendo en cuenta las condiciones ambientales de Bogotá y las especificaciones del proveedor tales como la capacidad del tanque de alimentación de solvente

Teniendo en cuenta las sustancias a utilizar en el experimento se hizo uso del modelo termodinámico UNIFAC, ya que las sustancias, son polares, no poseen electrolitos, además la presión de entrada al sistema no es mayor a los 10 bar y es un modelo comúnmente empleado para evaluar los coeficientes de actividad en mezclas líquidas. Esto de acuerdo con los árboles de decisión planteados por Eric C. Carlson. [37]

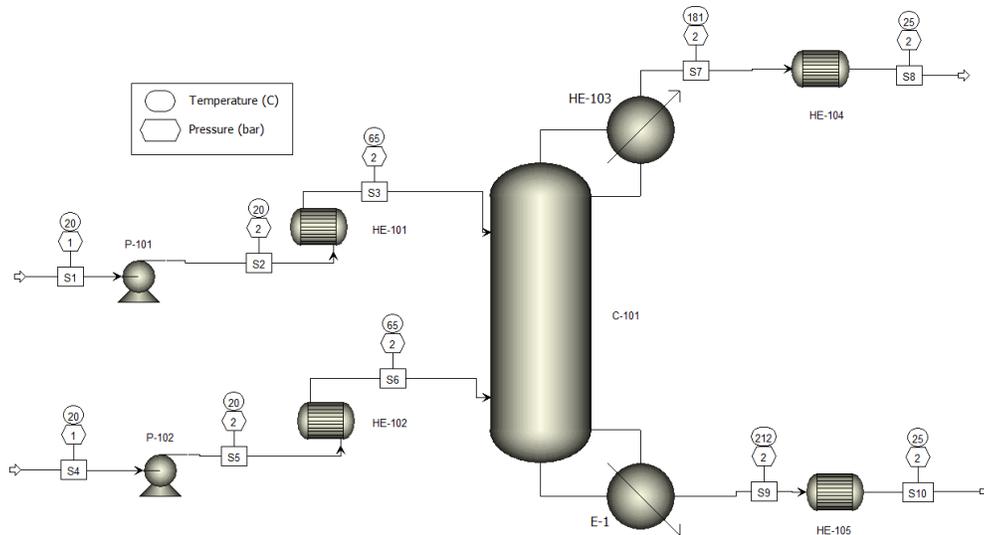
La corriente de la mezcla y la corriente de solvente ingresan cada una a una bomba P-102 y P-101 respectivamente, las cuales operan a una presión de 2 bar, posteriormente ingresan a un intercambiador de tubos y coraza HE 102 y HE-101 respectivamente que funcionan a contracorriente y se especifica la temperatura de salida de ambas corrientes como 65°C, se hace uso de vapor como servicio de calentamiento.

Posteriormente ingresan ambas corrientes a la torre de destilación C-101 la cual cuenta con 6 etapas, un condensador parcial-vapor, una presión en cimas de 2 bar, una razón de reflujo de 2 y una convergencia como "*Petroleum/Wide-boiling*" ya que no se obtendrían resultados cercanos a la realidad bajo una convergencia "Standard". Se realizan las alimentaciones por las etapas 3 y 6. Por último las corrientes de salida ingresan a intercambiadores de calor que permiten su almacenamiento a temperatura cercana a la temperatura ambiente.

Para este caso se configuró la torre de destilación para realizar un total de 25 iteraciones debido a que el sistema presenta resultados exactos en cuanto a la convergencia con el número base de iteraciones propuestas por Aspen Plus. Con dicha configuración de trabajo descrita previamente se analiza la destilación extractiva. A continuación, en la Figura 20 se evidencia la simulación realizada.

Figura 20.

Simulación correspondiente a la destilación extractiva



Nota: Se evidencia la pantalla principal de la simulación realizada correspondiente a la configuración de trabajo destilación extractiva, en donde se evidencian las temperaturas y la presión de cada corriente.

En el caso de la destilación extractiva se debe realizar un análisis de sensibilidad en el Capítulo 4 teniendo en cuenta variables como el flujo de alimentación de mezcla problema como de solvente, las presiones del rehervidor y el condensador, las etapas de alimentación de la columna y la razón de reflujo.

Adicionalmente en la Tabla 13 se evidencia un consolidado de las condiciones de operación y composiciones de cada una de las corrientes en donde se pueden evidenciar los productos obtenidos y sus características.

Tabla 13.*Resultados de la simulación correspondiente a la destilación extractiva*

Corriente	Unidades	S1	S2	S3	S4	S5
Desde			P-101	HE-101		P-102
Para		P-101	HE-101	C-101	P-102	HE-102
Fase		Líquida	Líquida	Líquida	Líquida	Líquida
Temperatura	C	20,00	20,10	65,00	20,00	20,11
Presión	bar	1,00	2,00	2,00	1,00	2,00
Fracción másica de vapor		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fracción másica líquido		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Flujo másico	kg/hr	1348,36	1348,36	1348,36	1258,88	1258,88
AGUA	kg/hr	0,00	0,00	0,00	251,78	251,78
ETANOL	kg/hr	0,00	0,00	0,00	1007,1	1007,1
ETILENGLICOL	kg/hr	1348,36	1348,36	1348,36	0,00	0,00
Fracciones másicas						
AGUA		0,00	0,00	0,00	0,2	0,2
ETANOL		0,00	0,00	0,00	0,8	0,8
ETILENGLICOL		1,00	1,00	1,00	0,00	0,00
Flujo volumétrico	l/min	20,00	20,00	20,76	25,00	25,00

Corriente	Unidades	S6	S7	S8	S9	S10
Desde		HE-102	C-101	HE-104	C-101	HE-105
Para		C-101	HE-104		HE-105	
Fase		Líquida	Vapor	Líquida	Líquida	Líquida
Temperatura	C	65,00	181,24	25,00	212,21	25,00
Presión	bar	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00

Fracción másica de vapor		0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
Fracción másica líquido		1,00	0,00	1,00	1,00	1,00
Flujo másico	kg/hr	1258,88	2142,06	2142,06	465,18	465,18
AGUA	kg/hr	251,78	250,45	250,45	1,33	1,33
ETANOL	kg/hr	1007,1	1004,76	1004,76	2,34	2,34
ETILENGLICOL	kg/hr	0,00	886,85	886,85	461,51	461,51
Fracciones másicas						
AGUA		0,2	0,12	0,12	2,86E-03	2,86E-03
ETANOL		0,8	0,47	0,47	0,01	0,01
ETILENGLICOL		0,00	0,41	0,41	0,99	0,99
Flujo volumétrico	l/min	26,70	37,4	37,83	8,35	6,94

Nota: Se evidencia la tabla resumen de las condiciones ingresadas de las corrientes que componen el proceso de etanol y agua con etilenglicol como solvente y las composiciones obtenidas de los productos finales. Ver Anexo 2.

Teniendo en cuenta las condiciones de operación de la simulación y la Tabla anterior se evidencia que las corrientes de salida por cimbras, las cuales corresponden a S7 y S8 se encuentran en su mayoría compuestas por etanol y por etilenglicol o el solvente que extrae al alcohol, igualmente las corrientes de salida de fondos correspondientes a S9 y S10 se encuentran compuestas mayoritariamente por etilenglicol, proceso que continúa con la recuperación del solvente para ser recirculado. Esto debido a la afinidad entre el etilenglicol y el etanol que permite que el experimento de destilación extractiva sea llevado a cabo.

-Destilación azeotrópica

En el caso de la configuración de trabajo como destilación azeotrópica se realiza uno de los experimentos estipulados en la Tabla 4. Tipos de experimentos de la unidad de destilación azeotrópica el cual consiste en una mezcla problema compuesta por ácido acético y

agua, a una composición de 60% ácido acético y 40% agua, la cual ingresa a una temperatura de 20°C, a una presión de 1 bar y con un flujo de 50 L/hora, esto teniendo en cuenta la capacidad del tanque de almacenamiento de la mezcla problema

Adicionalmente ingresa la corriente S1 compuesta por acetato de isobutilo con un flujo de 20L/hora el cual se encuentra a una temperatura de 20°C y presión de 1 bar, el cual forma el azeótropo con el ácido acético.

Teniendo en cuenta las sustancias a utilizar en el experimento se hizo uso del modelo termodinámico NRTL, ya que Aspen Plus cuenta con los parámetros de interacción binaria de las sustancias, son polares y no poseen electrolitos, además la presión de entrada al sistema no es mayor a los 10 bar. Esto de acuerdo con los árboles de decisión planteados por Eric C. Carlson. [37]

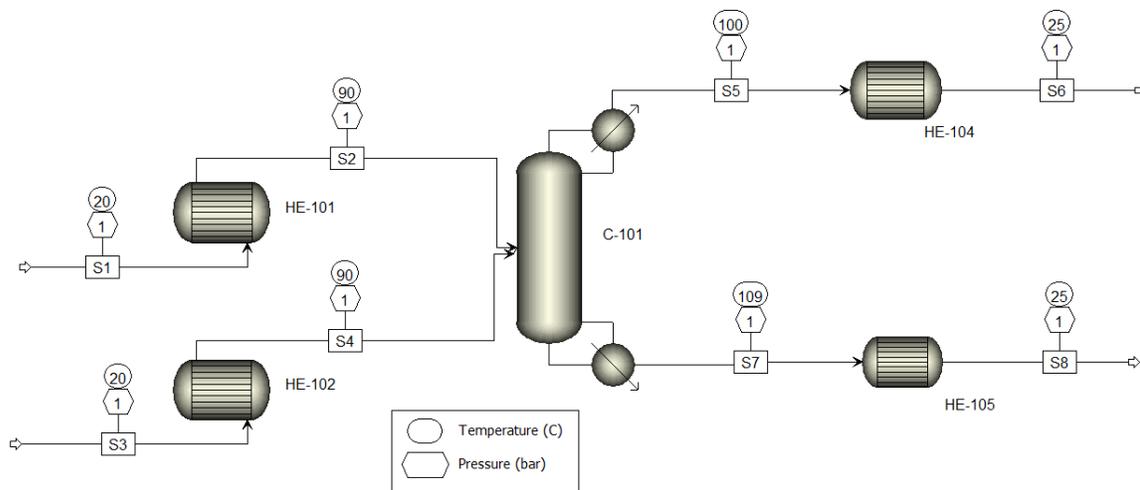
Las corrientes de alimentación pasan por intercambiadores de calor HE-101 y HE-102, los cuales son intercambiadores de coraza y tubos, de forma que las corrientes de entrada a la columna se encuentren a una temperatura de 90°C, se hace uso de vapor de baja presión como sistema de calentamiento.

Posteriormente ingresan a la columna de destilación la cual cuenta con 6 etapas, un condensador parcial-vapor, una presión en cimas de 1 bar, una razón de reflujo de 0.2 mol y una convergencia como “*Azeotropic*” ya que no se obtendrían resultados cercanos a la realidad bajo una convergencia “Standard”. Se realizan las alimentaciones por las etapas 3 y 4. Por último las corrientes de salida ingresan a intercambiadores de calor que permiten su almacenamiento a temperatura cercana a la temperatura ambiente.

Para este caso se configuró la torre de destilación para realizar un total de 25 iteraciones debido a que el sistema presenta resultados exactos en cuanto a la convergencia con el número base de iteraciones propuestas por Aspen Plus. Con dicha configuración de trabajo descrita previamente se analiza la destilación azeotrópica. A continuación, en la Figura 21 se evidencia la simulación realizada.

Figura 21.

Simulación correspondiente a destilación azeotrópica



Nota: Se evidencia la pantalla principal de la simulación realizada correspondiente a la configuración de trabajo destilación azeotrópica, en donde se evidencian las temperaturas y la presión de cada corriente

En la presente simulación se debe realizar un análisis de sensibilidad, de modo que se tengan en cuenta diferentes variables criterios que lleguen a afectar la eficiencia de la columna y la composición de los productos finales. Dichas variables por analizar son flujo de alimentación del acetato de isobutilo, la temperatura de entrada a la columna, la razón de reflujo, las etapas de alimentación y la presión de la columna.

Adicionalmente en la Tabla 14 se evidencia un consolidado de las condiciones de operación y composiciones de cada una de las corrientes en donde se pueden evidenciar los productos obtenidos y sus características.

Tabla 14.

Resultados de la simulación correspondiente a destilación azeotrópica

Corriente	Unidades	S1	S2	S3	S4
Desde			HE-101		HE-102
Para		HE-101	C-101	HE-102	C-101

Fase		Liquido	Liquido	Liquido	Liquido
Temperatura	C	20,00	90,00	20,00	90,00
Presión	bar	1,00	1,00	1,00	1,00
Fracción másica de vapor		0,00	0,00	0,00	0,00
Fracción másica liquido		1,00	1,00	1,00	1,00
Flujo másico	kg/hr	17,48	17,48	49,65	49,65
AGUA	kg/hr	0,00	0,00	19,86	19,86
ÁCIDO ACÉTICO	kg/hr	0,00	0,00	29,79	29,79
ACETATO DE ISOBUTILO	kg/hr	17,48	17,48	0,00	0,00
Fracciones másicas					
AGUA		0,00	0,00	0,4	0,4
ÁCIDO ACÉTICO		0,00	0,00	0,6	0,6
ACETATO DE ISOBUTILO		1,00	1,00	0,00	0,00
Flujo volumétrico	l/min	20,00	21,91	50,00	54,44

Corriente	Unidades	S5	S6	S7	S8
Desde		C-101	HE-104	C-101	HE-105
Para		HE-104		HE-105	
Fase		Vapor	Líquida	Líquida	Líquida
Temperatura	C	100,3	25,00	108,95	25,00
Presión	bar	1,00	1,00	1,00	1,00
Fracción másica de vapor		1,00	0,00	0,00	0,00
Fracción másica liquido		0,00	1,00	1,00	1,00
Flujo másico	kg/hr	46,47	46,47	20,66	20,66
AGUA	kg/hr	16,79	16,79	3,07	30,72
ÁCIDO ACÉTICO	kg/hr	12,45	12,45	17,34	17,34
ACETATO DE ISOBUTILO	kg/hr	17,24	17,24	0,243431	0,243431
Fracciones másicas					
AGUA		0,36	0,36	0,14	0,14
ÁCIDO ACÉTICO		0,26	0,26	0,83	0,83
ACETATO DE ISOBUTILO		0,37	0,37	0,01	0,01
Flujo volumétrico	l/min	48,78	48,65	22,64	20,27

Nota: Se evidencia la tabla resumen de las condiciones ingresadas de las corrientes que componen el proceso de la mezcla problema de ácido acético y agua junto con acetato de isobutilo y las composiciones obtenidas de los productos finales. Ver Anexo 3

Teniendo en cuenta las composiciones de las corrientes de salida, las cuales son S6 y S8 se evidencia que por fondos (S8), sale la mayor parte de ácido acético y por cimbras (S6) sale la mayor parte de acetato de isobutilo, lo que permite evidenciar que la separación del azeótropo se llevó a cabo satisfactoriamente. Cabe aclarar que en el presente experimento se presenta un segundo azeótropo entre el agua y el acetato de isobutilo, esto se evidencia en la composición de la corriente de cimbras debido a que el acetato no sale completamente puro, para realizar la separación de este, se recomienda realizar un proceso de decantación de modo que el acetato de isobutilo se obtenga puro.

6.3.2. Simulación de la unidad de absorción de gases

Con base en las especificaciones técnicas en cuanto a condiciones de operación de la unidad de absorción, se realizan una serie de simulaciones con respecto a estas, con el fin de poder realizar un análisis a nivel de ingeniería conceptual y poder establecer los alcances de cada uno de los equipos presentes en la unidad. De igual manera se evalúa la eficiencia de la operación, cantidad de materia prima, consumo energético y consumo de servicios auxiliares.

De acuerdo con lo establecido en el capítulo 3, en el numeral 3.2 donde se explican los componentes de la unidad de absorción de gases, se va a realizar la simulación del comportamiento de los equipos primordiales como lo son bombas, compresores, intercambiadores de calor y la torre de absorción, de acuerdo con las condiciones de operación especificadas por el proveedor especificadas en la Tabla 15.

Tabla 15.*Especificaciones de operación de la unidad de absorción dadas por el proveedor*

Condición de operación	Magnitud	Unidad
Capacidad de los tanques	50	L
Flujo del sistema de generación de aire	20	L/min
Presión mínima del sistema de generación de aire	2	bar
Flujo mínimo de aire de proceso	20	L/min
Presión mínima del aire de proceso	2	bar
Capacidad de remover del sistema de vacío	13	L/min
Presión mínima del sistema de vacío	0.1	bar

Nota: Se evidencian las especificaciones de operación correspondientes a los servicios auxiliares y características para tener en cuenta para la operación de la unidad de absorción de gases. [17]

- Absorción física

Para el primer experimento en relación con la absorción física, se realiza la purificación de aire con dióxido de azufre, usando el agua como solvente. La composición másica del gas a purificar es 70% de aire y el 30% restante corresponde a dióxido de azufre. Por otra parte, el solvente es constituye en su totalidad de agua.

El flujo de solvente de alimentación es de 30 L/min a una temperatura de 20 °C y una presión de 1 bar las cuales son condiciones ambientes en Bogotá, mientras que el flujo de gas a purificar es de 3500 L/min con las mismas condiciones iniciales de temperatura y presión. Estos flujos de alimentación se especificaron de esta forma teniendo en cuenta la capacidad de almacenamiento del tanque de solvente fresco y el flujo mínimo de generación de aire verificando que estos flujos sean los mínimos para realizar una buena separación y purificación sin generar inconvenientes tales como el secado de alguna de las etapas o el poco flujo de aire para realizar la operación.

Teniendo en cuenta las sustancias a utilizar en el experimento se hizo uso del modelo termodinámico NRTL, ya que Aspen Plus cuenta con los parámetros de interacción binaria de las sustancias, son polares y no poseen electrolitos, además la presión de entrada al sistema no es

mayor a los 10 bar. Esto de acuerdo con los árboles de decisión planteados por Eric C. Carlson. [37]

Por otro lado, se hace uso de una bomba (P-101) para el desplazamiento del solvente, un compresor (C-101) para desplazar la mezcla de gas a purificar, una torre de absorción (T-101) donde se lleva a cabo la eliminación de dióxido de azufre del aire; por último, se usa un intercambiador de tubos y coraza (HE-101) con el fin de enfriar el solvente gastado y asimismo poder almacenar el mismo.

La configuración inicial de los equipos como la bomba y el compresor es una presión de descarga del fluido de 2 bar. El intercambiador de calor es de tubos y coraza con una temperatura de salida de la corriente caliente de 25 °C gracias al uso del agua de enfriamiento como servicio. Estas condiciones son especificadas por el proveedor en el manual de usuario de la unidad de absorción de gases. Por otro lado, la temperatura de salida de la corriente caliente del intercambiador de calor se estimó con el fin de poder almacenar esta sustancia.

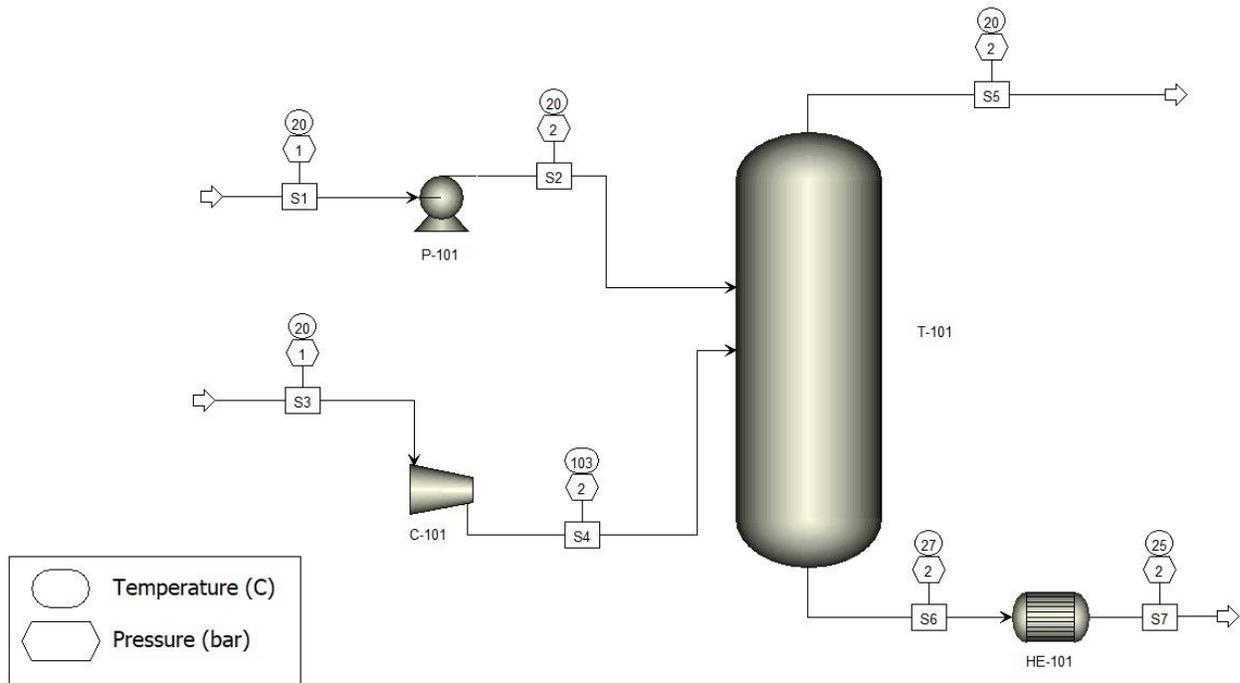
En cuanto a la torre de absorción cuenta con 6 etapas, una presión en cimas de 2 bar y una caída de presión en el resto de la torre de 0,5 bar, esta unidad no posee hervidor ni condensador. Tiene una convergencia “*Standard*”, ya que este tipo de convergencia está diseñado para un sistema que posea como máximo dos fases sean líquido o vapor.

Las etapas de alimentación de solvente fresco y gas es la primera y la sexta etapa respectivamente. La presión de cimas es la mínima teniendo en cuenta la presión de entrada del solvente fresco, la cual está pautada por el proveedor en las especificaciones mencionadas en la Tabla 14. Por otro lado, las condiciones restantes fueron estimadas en su totalidad con el fin de poder variar las mismas e identificar las condiciones óptimas de operación para optimizar la eficiencia en la unidad.

Para este caso se configuró la torre de absorción para realizar un total de 100 iteraciones debido a que el sistema presenta resultados más exactos en cuanto a la convergencia con un mayor número de iteraciones. Con dicha configuración de trabajo descrita previamente se analiza la absorción física mediante uno de los experimentos estipulados en la Tabla 5 Tipos de operación a realizar en la unidad de absorción de gases. A continuación, en la Figura 22 se evidencia la simulación realizada

Figura 22.

Simulación correspondiente a absorción física



Nota: Se evidencia la pantalla principal de la simulación realizada correspondiente a la configuración de trabajo absorción física, en donde se evidencian las temperaturas y la presión de cada corriente.

Cabe resaltar que se realiza un análisis de sensibilidad con el fin de identificar las condiciones óptimas de operación de los equipos pertenecientes a la unidad y asimismo obtener el mayor índice de separación de dióxido de azufre obteniendo un aire con menos fracción másica de este compuesto optimizando la unidad. Las variables por estudiar son los flujos de alimentación tanto de solvente fresco como de gas, la presión de la bomba y el compresor, las etapas de alimentación en la torre de absorción, la presión de cimas y la caída de presión de la torre de absorción. Dicho análisis se lleva a cabo en el capítulo 4 “Análisis de la información de validación”.

Adicionalmente en la Tabla 16 se evidencia un consolidado de las condiciones de operación y composiciones de cada una de las corrientes en donde se pueden evidenciar los productos obtenidos y sus características.

Tabla 16.*Resultados de la simulación correspondiente a absorción física*

Corriente	Unidades	S1	S2	S3	S4
Desde			P-101		C-101
Para		P-101	T-101	C-101	T-101
Fase		Líquida	Líquida	Vapor	Vapor
Temperatura	C	20,00	20,08	20,00	103,17
Presión	bar	1,00	2,00	1,00	2,00
Fracción másica de vapor		0,00	0,00	1,00	1,00
Fracción másica liquido		1,00	1,00	0,00	0,00
Flujo másico	kg/hr	1797,78	1797,78	298,53	298,53
DIOXIDO DE AZUFRE	kg/hr	0,00	0,00	89,56	89,56
AGUA	kg/hr	1797,78	1797,78	0,00	0,00
AIRE	kg/hr	0,00	0,00	208,97	208,97
Fracciones másicas					
DIOXIDO DE AZUFRE		0,00	0,00	0,3	0,3
AGUA		1,00	1,00	0,00	0,00
AIRE		0,00	0,00	0,7	0,7
Flujo volumétrico	l/min	30,00	30,00	3500,00	2246,47

Corriente	Unidades	S5	S6	S7
Desde		T-101	T-101	HE-101
Para			HE-101	
Fase		Vapor	Líquida	Líquida
Temperatura	C	20,12	26,90	25,00
Presión	bar	2,00	2,00	2,00
Fracción másica de vapor		1,00	0,00	0,00
Fracción másica líquido		0,00	1,00	1,00
Flujo másico	kg/hr	203,52	1892,78	1892,78
DIOXIDO DE AZUFRE	kg/hr	0,02	89,53	89,53
AGUA	kg/hr	1,50	1796,29	1796,29
AIRE	kg/hr	202,01	6,96	6,96
Fracciones másicas				
DIOXIDO DE AZUFRE		1,18E-4	0,05	0,05
AGUA		7,34E-3	0,95	0,95
AIRE		0,99	0,00	0,00
Flujo volumétrico	l/min	1434,74	31,30	31,24

Nota: Se evidencia la tabla resumen de las condiciones ingresadas de las corrientes que componen el proceso de aire contaminado con dióxido de azufre y agua como solvente y las composiciones obtenidas de los productos finales. Ver Anexo 4.

Mediante los resultados obtenidos se puede evidenciar que la corriente de salida de cimas, es decir, el aire purificado tiene trazas mínimas de dióxido de azufre y sale de la torre con un mayor porcentaje de agua. Por otro lado, en la corriente de salida de fondos, es decir, el solvente gastado contiene 5% de dióxido de azufre por lo que se demuestra que con las condiciones iniciales la torre tiene una eficiencia del 90% aproximadamente.

Para el segundo experimento de la absorción física se realiza la purificación de un gas como al aire contaminado con amoníaco, para este caso se usa agua como solvente. El gas por purificar tiene una composición de 10% de amoníaco y el restante corresponde a aire, mientras que el solvente está compuesto únicamente por agua.

Teniendo en cuenta las sustancias a utilizar en el experimento se hizo uso del modelo termodinámico NRTL, ya que Aspen Plus cuenta con los parámetros de interacción binaria de las sustancias, son polares y no poseen electrolitos, además la presión de entrada al sistema no es

mayor a los 10 bar. Esto de acuerdo con los árboles de decisión planteados por Eric C. Carlson. [37]

El flujo de gas contaminado es de 1300 L/min mientras que el flujo de solvente de alimentación es de 50 L/min. Los dos fluidos se encuentran a condiciones ambiente de Bogotá como lo son una temperatura de 20 °C y una presión de 1 bar. Dichos flujos se determinaron teniendo en cuenta la capacidad de almacenamiento del tanque de solvente fresco y los flujos mínimos de los fluidos para obtener una buena separación del compuesto problema. Esto debido a que se pueden presentar problemas en la simulación tales como el secado en alguna de las etapas de la torre de absorción, poco flujo de aire para realizar la operación y debido a esto no se enfría el solvente gastado.

De igual manera como en el experimento anterior se hace uso de una bomba (P-101) para el desplazamiento del solvente, un compresor (C-101) para desplazar la mezcla de gas a purificar, una torre de absorción (T-101) donde se lleva a cabo la eliminación del amoníaco presente en el aire; por último, se usa un intercambiador de tubos y coraza (HE-101) con el fin de enfriar el solvente gastado y asimismo poder almacenar el mismo.

La configuración inicial de los equipos como el intercambiador de calor es de tubos y coraza con una temperatura de salida de la corriente caliente de 25 °C gracias al uso del agua de enfriamiento como servicio. Por otra parte, la bomba y el compresor tienen presión de descarga del fluido de 11 bar. Estas condiciones se especificaron por medio del manual de usuario de la unidad de absorción de gases suministrado por el proveedor ilustrado en la Tabla 14. Por otro lado, la temperatura de salida de la corriente caliente del intercambiador de calor se estimó con el fin de poder almacenar esta sustancia.

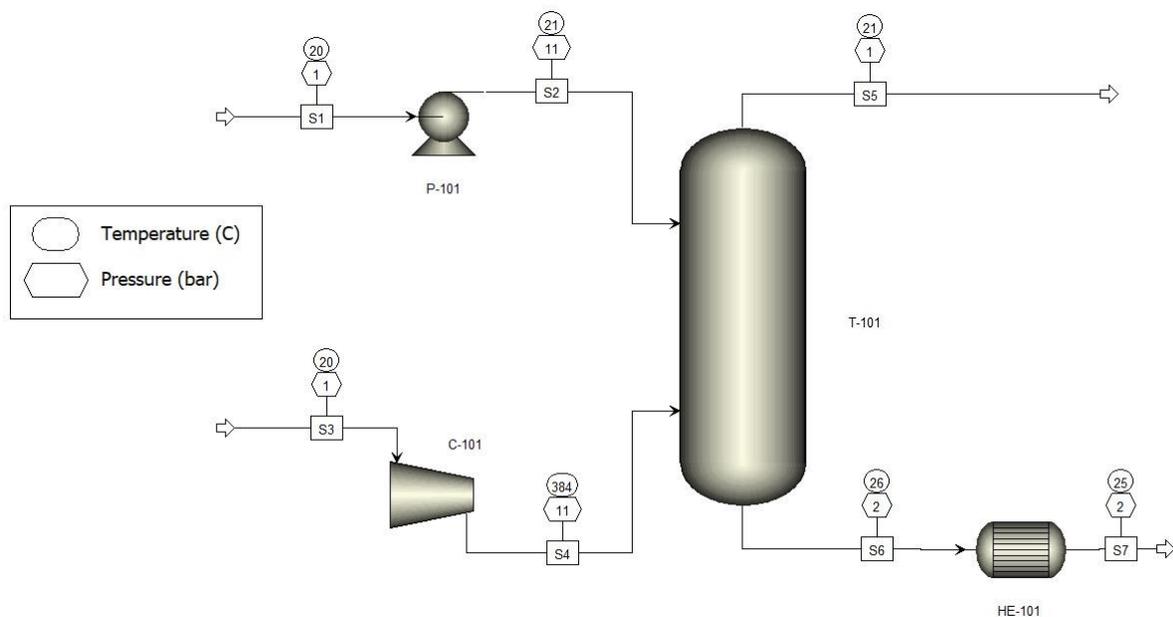
La torre de absorción tiene un total de 6 etapas, una presión en cimas de 1 bar y una caída de presión en el resto de la torre de 0,5 bar. La unidad está configurada con una convergencia de “*Petroleum /Wide boiling*” ya que en este caso la diferencia entre los puntos de ebullición de los componentes de la mezcla de gases es muy grande por lo que en la convergencia “*Standard*” no se obtienen resultados realistas. Las etapas de alimentación de solvente fresco y de gas es la primera y la sexta respectivamente. Las condiciones de operación para esta unidad fueron

estimadas para poder analizar el comportamiento de la mezcla y la eficiencia que presenta la torre en primera instancia y asimismo estimar condiciones óptimas de la unidad.

Cabe resaltar que se configuró la torre de absorción para realizar un total de 100 iteraciones debido a que el sistema presenta resultados más exactos en cuanto a la convergencia con un mayor número de iteraciones. Para este caso y según la configuración de trabajo planteada y descrita anteriormente se analiza la absorción física del amoniaco presente en el aire mediante la simulación dicha mezcla problema. A continuación, en la Figura 23 se evidencia la simulación realizada

Figura 23.

Segunda simulación correspondiente a absorción física



Nota: Se evidencia la pantalla principal de la segunda simulación realizada correspondiente a la configuración de trabajo absorción física, en donde se evidencian las temperaturas y la presión de cada corriente.

Cabe resaltar que se realiza un análisis de sensibilidad con el fin de identificar las condiciones óptimas de operación de los equipos pertenecientes a la unidad y asimismo obtener el mayor índice de separación del amoniaco presente en el aire reflejado en la fracción másica en la corriente de

salida de cimas optimizando la unidad. Las variables para estudiar su influencia en el proceso son los flujos de alimentación tanto de solvente fresco como de gas, la presión de la bomba y el compresor, las etapas de alimentación en la torre de absorción, la presión de cimas y la caída de presión de la torre de absorción. Dicho análisis se lleva a cabo en el capítulo 4 “Análisis de la información de validación”.

Adicionalmente en la Tabla 17 se evidencia un consolidado de las condiciones de operación y composiciones de cada una de las corrientes en donde se pueden evidenciar los productos obtenidos y sus características.

Tabla 17.*Resultados de la segunda simulación correspondiente a absorción física*

Corriente	Unidades	S1	S2	S3	S4
Desde			P-101		C-101
Para		P-101	T-101	C-101	T-101
Fase		Líquida	Líquida	Vapor	Vapor
Temperatura	C	20,00	20,83	20,00	383,61
Presión	bar	1,00	11,00	1,00	11,00
Fracción másica de vapor		0,00	0,00	1,00	1,00
Fracción másica de líquido		1,00	1,00	0,00	0,00
Flujo másico	kg/hr	2996,30	2996,30	86,59	86,59
AIRE	kg/hr	0,00	0,00	77,93	77,93
AMONIACO	kg/hr	0,00	0,00	8,66	8,66
AGUA	kg/hr	2996,30	2996,30	0,00	0,00
Fracciones másicas					
AIRE		0,00	0,00	0,90	0,90
AMONIACO		0,00	0,00	0,10	0,10
AGUA		1,00	1,00	0,00	0,00
Flujo volumétrico	l/min	50,00	50,04	1300,00	264,77

Corriente	Unidades	S5	S6	S7
Desde		T-101	T-101	HE-101
Para			HE-101	
Fase		Vapor	Líquida	Líquida
Temperatura	C	20,83	26,02	25,00
Presión	bar	1,00	1,50	1,50

Fracción másica de vapor		1,00	0,00	0,00
Fracción másica de líquido		0,00	1,00	1,00
Flujo másico	kg/hr	70,19	3012,70	3012,70
AIRE	kg/hr	69,11	8,82	8,82
AMONIACO	kg/hr	0,00	8,66	8,66
AGUA	kg/hr	1,08	2995,22	2995,22
Fracciones másicas				
AIRE		0,98	0,00	2,92E-3
AMONIACO		2,22E-15	0,00	2,87E-3
AGUA		1,54E-2	0,99	0,99
Flujo volumétrico	l/min	996,93	50,68	50,63

Nota: Se evidencia la tabla resumen de las condiciones ingresadas de las corrientes que componen el proceso de aire contaminado con amoníaco y agua como solvente y las composiciones obtenidas de los productos finales. Ver Anexo 5.

Analizando los resultados obtenidos en la corriente de cimás, es decir, el aire previamente purificado se evidencia tiene una presencia mínima de amoníaco y sale con un mayor índice de humedad debido al uso de agua como solvente. Por otro lado, en la corriente de fondos, es decir, el solvente gastado se evidencia una mayor presencia de amoníaco ya que fue absorbido con éxito por el solvente. Con base en estos resultados la torre presenta una eficiencia de aproximadamente el 70%.

Por otro lado, en los dos casos de la absorción física se usaron flujos altos de gas en su mayoría constituido por aire. Esto debido a que el aire es un gas muy volátil y en la naturaleza se evidencia en estado gaseoso, por lo que se disipa con mucha facilidad y se necesitan flujos altos para obtener en las corrientes de producto un flujo mucho menor al que fue suministrado en la alimentación.

7. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DE VALIDACIÓN

Durante el proceso de validación de los experimentos más comunes realizados en la industria en cuanto a procesos de absorción y destilación se evidencian resultados favorables que permiten concluir que es posible llevar a cabo los experimentos en el Centro de Procesos de la Universidad de América, sin embargo, es fundamental realizar un análisis de cada una de las variables criterio que pueden afectar el correcto funcionamiento de la columna, al igual que las composiciones y características de los productos obtenidos.

Lo anterior se realiza con el fin de evidenciar opciones de mejora y así mismo proponer alternativas de operación que permitan optimizar el funcionamiento de las unidades de proceso, esto se realiza posteriormente mediante un análisis de sensibilidad el cual permite estudiar cada una de las variables criterio establecidas mencionadas a continuación, realizando variaciones lógicas y así predecir resultados y concluir alternativas de operación.

VARIABLES CRITERIO:

- Flujo de alimentación de la mezcla problema
- Flujo de alimentación del solvente
- Presión de la columna de destilación o absorción
- Temperatura de la corriente de entrada a la columna

Mediante el análisis de sensibilidad se busca estudiar la afectación directa o indirecta sobre las variables descritas a continuación, mediante el simulador Aspen Plus.

VARIABLES DEPENDIENTES:

- Flujo del producto deseado
- Composición del producto deseado
- Porcentaje de separación
- Costos de servicios auxiliares (costo energético y utilidades (vapor y agua))

Esto es fundamental debido a que facilita la toma de decisiones en el momento en el que se realice la puesta en marcha y arranque de las unidades objeto de ensayo del presente proyecto, asegura un

control de calidad debido a que previamente a los procesos de arranque se ha realizado un análisis profundo de la afectación de diferentes variables, optimiza los recursos o en este caso los servicios auxiliares debido a que se realiza un análisis en los costos de los mismos y pronostica los resultados que se obtendrán al momento en que se realicen en sitio los experimentos simulados.

Como se mencionó anteriormente se realiza un análisis sobre el porcentaje de separación de la columna, el cálculo se realiza teniendo en cuenta el flujo de entrada del componente a separar y el flujo de salida de este en la corriente deseada.

Cabe resaltar que los porcentajes y la naturaleza de los componentes a separar y los solventes en los experimentos se basan en las recomendaciones brindadas por el proveedor (Process Solutions Equipment) para realizar la validación de las unidades, las cuales se evidencian en los manuales de operación de los sistemas, ya que estas son sustancias seguras y fáciles de conseguir a las composiciones analizadas, sin incurrir en grandes costos para evaluar el correcto funcionamiento de estas e identificar las variables críticas a controlar. Sin embargo, se deben realizar variaciones sobre las composiciones de las mezclas problema e implementar distintos solventes para evaluar la afectación en el proceso de separación.

7.1. Análisis de la información de validación de la unidad de destilación continua

7.1.1. Destilación normal

En el proceso de destilación normal realizado en el capítulo 6, como se mencionó anteriormente, se emplea un flujo de alimentación de la mezcla problema (compuesta por etanol y agua) con una composición del 50% de 20 L/h, esto debido a la capacidad del tanque de alimentación de mezcla problema empleado en la unidad de destilación continua. No se emplea solvente en el presente experimento debido a que se realiza una operación de destilación normal.

Posteriormente la corriente pasa por un intercambiador de calor HE-102 el cual permite que la corriente ingrese a la columna de destilación a una temperatura de 65°C, cabe aclarar que la temperatura de ebullición del componente etanol es de 78,37°C

En cuanto a las especificaciones de la columna, la presión de la columna es de 1 bar manteniendo las condiciones iniciales de la mezcla problema que ingresa a la unidad de destilación continua, con el fin de evaluar las condiciones de separación sin realizar cambios en la presión, sin embargo, posteriormente se realiza un análisis de sensibilidad en donde se realizan alteraciones en el valor de la presión de operación de la columna.

Al ser el flujo de 20 litros por hora, ingresan a la unidad un flujo de 8,94 kg/hora de etanol, por la corriente de cimbras, siendo la corriente S4 salen 8,93kg/h de etanol, lo que representa una composición de la corriente de cimbras del 79%, sin embargo, como se observa en los flujos el porcentaje de separación es del 99%, esto se observa en la Figura 24 a continuación

Figura 24.

Fracción de separación de etanol y agua en la columna de destilación correspondiente a destilación normal

	Component	S4	S6
▶	WATER	0,263234	0,736766
▶	ETHANOL	0,999928	7,24531e-05

Nota: Se evidencia el consolidado de fracciones de separación de cada uno de los componentes presentes en la mezcla problema del experimento, siendo la corriente S4 la corriente de cimbras y la corriente S6 la corriente de fondos.

Con respecto a los costos de los servicios auxiliares, se realiza el estimado en el simulador Aspen Plus, el cual indica que el experimento de destilación normal tiene un costo en cuanto a servicios auxiliares de 38451 dólares al año, sin embargo, en el caso del Centro de Procesos de la Universidad no se tiene en cuenta un horario constante de uso de la torre ya que depende del uso que le den los estudiantes, por esta razón se realiza un estimado de que la torre se usará máximo 4 horas al día, todos los días de la semana, de lunes a viernes, durante 6 meses al año (3 meses de uso por cada semestre estudiantil), lo que da un total de 480 horas al año de uso de la columna, lo que implica un costo de servicios auxiliares mucho menor.

7.1.2. Destilación extractiva

En el proceso de destilación extractiva realizado en el capítulo 6, como se mencionó anteriormente, se emplea un flujo de alimentación de la mezcla problema (compuesta por etanol y agua) con una composición del 80% de etanol de 25 L/min, esto debido a la capacidad del tanque de alimentación de mezcla problema empleado en la unidad de destilación continua. Se emplea como solvente etilenglicol con un flujo de 20 L/min de forma que realice el proceso de extracción de etanol y se genere la separación de la mezcla problema. Posteriormente la corriente pasa por un intercambiador de calor HE-102 el cual permite que la corriente ingrese a una temperatura de 65°C, cabe aclarar que la temperatura de ebullición del componente etanol es de 78,37°C

En cuanto a las especificaciones de la columna, la presión de la columna es de 2 bares, con el fin de evaluar las condiciones de separación sin realizar cambios significativos en la presión, sin embargo, posteriormente se realiza un análisis de sensibilidad en donde se realizan alteraciones en el valor de la presión de operación de la columna. Al ser el flujo de 25 litros por minuto, ingresan a la unidad un flujo de 1007,1 kg/hora de etanol, por la corriente de cimbras, siendo la corriente S7 salen 1004,76 kg/h de etanol, lo que representa una composición de la corriente de cimbras del 47%, sin embargo, como se observa en los flujos el porcentaje de separación es del 99%, esto se observa en la Figura 25 a continuación

Figura 25.

Fracción de separación de etanol, agua y etilenglicol en la columna de destilación correspondiente a destilación extractiva

Component	S7	S9
▶ WATER	0,994715	0,00528465
▶ ETHANOL	0,997678	0,00232225
▶ ETHYL	0,657725	0,342275

Nota: Se evidencia el consolidado de fracciones de separación de cada uno de los componentes presentes en la mezcla problema y el solvente del experimento de destilación extractiva, siendo la corriente S7 la corriente de cimbras y la corriente S9 la corriente de fondos.

Con respecto a los costos de los servicios auxiliares, se realiza el estimado en el simulador Aspen Plus, el cual indica que el experimento de destilación extractiva tiene un costo en cuando a servicios auxiliares de 1'162.270 dólares al año, sin embargo, teniendo en cuenta la estimación realizada y explicada anteriormente en el ítem 7.1.1. se realiza la estimación con base en 480 horas al año del uso de la columna, lo que implicaría un costo máximo de servicios auxiliares de 63600 dólares anuales aproximadamente. Esto se evidencia en la Figura 26 a continuación.

Figura 26.

Costos de los servicios auxiliares de la unidad de destilación continua correspondientes al experimento de destilación extractiva

	Name	Fluid	Rate	Rate Units	Cost per Hour	Cost Units
▶	Electricity		54,931	KW	4,25715	USD/H
▶	Cooling Water	Water	0,032298	MMGAL/H	3,87576	USD/H
▶	AP-UTIL-U-1	Steam	301869	BTU/H	0,603737	USD/H
▶	AP-UTIL-U-2	Water	3,14844E+06	BTU/H	0,705251	USD/H
▶	Steam @400PSI	Steam	10,5164	KLB/H	123,147	USD/H

Nota: Se evidencia las magnitudes de cada uno de los servicios auxiliares y su costo por hora en dólares de la unidad de destilación continua correspondiente al experimento de destilación extractiva

7.1.3. Destilación azeotrópica

En el proceso de destilación azeotrópica realizado en el capítulo 6, como se mencionó anteriormente, se emplea un flujo de alimentación de la mezcla problema (compuesta por ácido acético y agua) con una composición del 60% de ácido acético de 50 L/hora, esto debido a la capacidad del tanque de alimentación de mezcla problema empleado en la unidad de destilación continua. Se emplea como solvente acetato de isobutilo con un flujo de 20 L/hora de forma que realice el proceso de extracción de ácido acético y se genere la separación de la mezcla problema

Posteriormente la corriente pasa por un intercambiador de calor HE-102 el cual permite que la corriente ingrese a la columna de destilación a una temperatura de 95°C, cabe aclarar que la temperatura de ebullición del componente ácido acético es 118°C

En cuanto a las especificaciones de la columna, la presión de la columna es de 1 bar, manteniendo las condiciones iniciales de la mezcla problema que ingresa a la unidad de destilación continua, con el fin de evaluar las condiciones de separación sin realizar cambios en la presión, sin embargo, posteriormente se realiza un análisis de sensibilidad en donde se realizan alteraciones en el valor de la presión de operación de la columna.

Al ser el flujo de 50 litros por hora, ingresan a la unidad un flujo de 17,48 kg/hora de acetato de isobutilo, por la corriente de cimbras, siendo la corriente S5 salen 17,24 kg/h de acetato de isobutilo, lo que representa una composición de la corriente de cimbras del 37%, sin embargo, como se observa en los flujos, el porcentaje de separación es del 98%. Esto se observa en la Figura 27.

En el caso del ácido acético ingresan 29,79 kg/hr y por la corriente de fondos, siendo la corriente S7 salen 17,34 kg/hr, lo que representa una composición de la corriente de fondos del 83%, sin embargo, como se observa en los flujos, el porcentaje de separación es del 58%. Esto se observa en la Figura 27 a continuación.

Figura 27.

Fracción de separación de ácido acético, agua y acetato de isobutilo en la columna de destilación correspondiente a destilación azeotrópica.

	Component	S5	S7
▶	WATER	0,845337	0,154663
▶	ACETI-01	0,417845	0,582155
▶	ISOBU-01	0,986076	0,013924

Nota: Se evidencia el consolidado de fracciones de separación de cada uno de los componentes presentes en la mezcla problema y el solvente del experimento de destilación azeotrópica, siendo la corriente S5 la corriente de cimbras y la corriente S7 la corriente de fondos.

Con respecto a los costos de los servicios auxiliares, se realiza el estimado en el simulador Aspen Plus, el cual indica que el experimento de destilación extractiva tiene un costo en cuando a servicios auxiliares de 36.947 dólares al año, sin embargo, teniendo en cuenta la estimación

realizada y explicada anteriormente en el ítem 7.1.1. se realiza la estimación con base en 480 horas al año del uso de la columna, lo que implicaría un costo máximo de servicios auxiliares de 2020 dólares al año aproximadamente. Esto se calcula teniendo en cuenta los valores en la Figura 28 a continuación.

Figura 28.

Costos de los servicios auxiliares de la unidad de destilación continua correspondientes al experimento de destilación azeotrópica

	Name	Fluid	Rate	Rate Units	Cost per Hour	Cost Units
▶	Electricity		52,413	KW	4,06201	USD/H
▶	Cooling Water	Water	5,2E-05	MMGAL/H	0,00624	USD/H
▶	AP-UTIL-U-1	Steam	66910,4	BTU/H	0,133821	USD/H
▶	AP-UTIL-U-2	Water	57072,5	BTU/H	0,012784	USD/H

Nota: Se evidencia las magnitudes de cada uno de los servicios auxiliares y su costo por hora en dólares de la unidad de destilación continua correspondiente al experimento de destilación azeotrópica

7.2. Análisis de la información de validación de la unidad de absorción de gases

7.2.1. Absorción física

En el primer experimento de absorción física realizado en el capítulo 6, como se mencionó anteriormente, se emplea un flujo de alimentación de gas contaminado (compuesta por dióxido de azufre y aire) de 3500 L/min, este gas cuenta con una composición de 30% de dióxido de azufre, debido a la capacidad de la bomba de alimentación de aire en la unidad de absorción de gases. Se emplea como solvente agua pura con un flujo de 30 L/min teniendo en cuenta la capacidad del tanque de alimentación de solvente fresco. Los flujos implementados se establecen con la finalidad de generar de manera exitosa la purificación del aire.

Posteriormente la corriente de solvente fresco pasa por una bomba (P-101), de igual manera la corriente de gas problema pasa por un compresor (C-101). Ambas unidades generan un cambio de presión en los fluidos, la configuración inicial de los equipos es una presión de descarga de 2 bar.

Este aumento se realiza con el fin de aumentar la temperatura de los fluidos previamente a entrar a la torre de absorción y asimismo generar una mejor absorción del componente a separar.

En cuanto a las especificaciones de la columna, la presión en la parte de cimas es de 2 bar teniendo en cuenta la presión de entrada del solvente fresco.

Al ser el flujo de solvente fresco 30 litros por minuto, ingresan a la unidad un flujo de 1797,78 kg/hora de agua pura. Por la corriente de cimas, siendo la corriente S5 salen 203,50 kg/h de aire limpio, lo que representa una composición de la corriente de cimas del 99,26%, sin embargo, como se observa en los flujos, el porcentaje de separación es del 96%. Esto se observa en la Figura 29.

En el caso del gas contaminado ingresan 298,53 kg/hr y por la corriente de fondos, siendo la corriente S6 salen 1892,81 kg/hr, en cuanto a la composición de la corriente S6 se observa un 4,73% correspondiente al dióxido de azufre que fue retirado del aire. Sin embargo, como se observa en los flujos, el porcentaje de separación es del 99% aproximadamente. Esto se observa en la Figura 29 a continuación.

Figura 29.

Fracción de dióxido de azufre, agua y aire en la columna de absorción correspondiente a absorción física

Component	S5	S6
▶ DIOXIDO	4,12004e-06	1
▶ WATER	0,000830536	0,999169
▶ AIR	0,966699	0,033301

Nota: Se evidencia el consolidado de fracciones de separación de cada uno de los componentes presentes en la mezcla problema y el solvente del experimento de absorción física, siendo la corriente S5 la corriente de cimas y la corriente S6 la corriente de fondos.

Con respecto a los costos de los servicios auxiliares, se realiza el estimado en el simulador Aspen Plus, el cual indica que el experimento de absorción física tiene un costo en cuando a servicios auxiliares de 36.947 dólares al año, sin embargo, teniendo en cuenta la estimación realizada y

explicada anteriormente en el ítem 7.1.1. se realiza la estimación con base en 480 horas al año del uso de la columna, lo que implicaría un costo máximo de servicios auxiliares de 2200 dólares anuales. Esto se evidencia en la Figura 30 a continuación.

Figura 30.

Costos de los servicios auxiliares de la unidad de absorción de gases correspondientes al experimento de absorción física

	Name	Fluid	Rate	Rate Units	Cost per Hour	Cost Units
▶	Electricity		60,153	KW	4,66186	USD/H
▶	AP-UTIL-U-1	Water	13678,2	BTU/H	0,003064	USD/H

Nota: Se evidencia las magnitudes de cada uno de los servicios auxiliares y su costo por hora en dólares de la unidad de absorción de gases correspondiente al experimento de absorción física

Por otra parte, en el segundo experimento de absorción física realizado en el capítulo 6, como se mencionó anteriormente, se emplea un flujo de alimentación de gas contaminado (compuesta por amoníaco y aire) de 1300 L/min, este gas cuenta con una composición de 10% de amoníaco, debido a la capacidad de la bomba de alimentación de aire en la unidad de absorción de gases. Se emplea como solvente agua pura con un flujo de 50 L/min teniendo en cuenta la capacidad del tanque de alimentación de solvente fresco. Los flujos implementados se establecen con la finalidad de generar de manera exitosa la purificación del aire.

Posteriormente la corriente de solvente fresco pasa por una bomba (P-101), de igual manera la corriente de gas problema pasa por un compresor (C-101). Ambas unidades generan un cambio de presión en los fluidos, la configuración inicial de los equipos es una presión de descarga de 2 bar. Este aumento se realiza con el fin de aumentar la temperatura de los fluidos previamente a entrar a la torre de absorción y asimismo generar una mejor absorción del componente a separar.

En cuanto a las especificaciones de la columna, la presión en la parte de cimás es de 2 bar teniendo en cuenta la presión de entrada del solvente fresco.

Al ser el flujo de solvente fresco 50 litros por minuto, ingresan a la unidad un flujo de 2996,3 kg/hora de agua pura. Por la corriente de cimbras, siendo la corriente S5 salen 70,19 kg/h de aire limpio, lo que representa una composición de la corriente de cimbras del 98,46%, sin embargo, como se observa en los flujos, el porcentaje de separación es del 88,68%. Esto se observa en la Figura 31.

En el caso del gas contaminado ingresan 86,58 kg/hr y por la corriente de fondos, siendo la corriente S6 salen 3012,7 kg/hr, en cuanto a la composición de la corriente S6 se observa un 0,29% correspondiente al amoníaco que fue retirado del aire. Sin embargo, como se observa en los flujos, el porcentaje de separación es del 99% aproximadamente. Esto se observa en la Figura 31 a continuación.

Figura 31.

Fracción de amoníaco, agua y aire en la columna de absorción correspondiente a absorción física

	Component	S5	S6
▶	WATER	0,000361701	0,999638
▶	AMMONIA	1,80104e-14	1
▶	AIR	0,886787	0,113213

Nota: Se evidencia el consolidado de fracciones de separación de cada uno de los componentes presentes en la mezcla problema y el solvente del experimento de absorción física, siendo la corriente S5 la corriente de cimbras y la corriente S6 la corriente de fondos.

Con respecto a los costos de los servicios auxiliares, se realiza el estimado en el simulador Aspen Plus, el cual indica que el experimento de absorción física tiene un costo en cuando a servicios auxiliares de 36.947 dólares al año, sin embargo, teniendo en cuenta la estimación realizada y explicada anteriormente en el ítem 7.1.1. se realiza la estimación con base en 480 horas al año del uso de la columna, lo que implicaría un costo máximo de servicios auxiliares de 2500 dólares anuales. Esto se evidencia en la Figura 32 a continuación.

Figura 32.

Costos de los servicios auxiliares de la unidad de absorción de gases correspondientes al segundo experimento de absorción física

	Name	Fluid	Rate	Rate Units	Cost per Hour	Cost Units
▶	Electricity		67,613	KW	5,24001	USD/H
▶	AP-UTIL-U-1	Water	12319,3	BTU/H	0,00276	USD/H

Nota: Se evidencia las magnitudes de cada uno de los servicios auxiliares y su costo por hora en dólares de la unidad de absorción de gases correspondiente al segundo experimento de absorción física

7.3. Análisis de sensibilidad

7.3.1. Análisis de sensibilidad correspondiente a destilación normal

En el experimento de destilación normal se realiza un análisis de sensibilidad teniendo en cuenta las variables criterio que afectan el factor de separación de la torre de destilación, la composición del producto deseado en la corriente de cima, en este caso etanol, los costos de servicios auxiliares y los límites máximos de forma que sean aplicables y tenidos en cuenta al momento de arrancar la unidad de destilación al igual que en su uso cotidiano.

Inicialmente se realiza un análisis de sensibilidad efectuando variaciones en la etapa de alimentación de la mezcla problema, teniendo en cuenta que la torre cuenta con 6 etapas se realiza un análisis en cuanto al factor de separación de etanol y la composición de etanol en la corriente de cimbras S4, esto de evidencia en la Tabla 18 a continuación.

Tabla 18.

Análisis de sensibilidad de la etapa de alimentación correspondiente al experimento de destilación normal.

Etapa de alimentación	Factor de separación del etanol	Composición másica del etanol
1	0,945755	0,740452
2	0,999975	0,791653
3	0,999928	0,7916
4	0,999448	0,791149
5	0,994755	0,786674
6	0,957213	0,75118

Nota: Se evidencia en la tabla los valores correspondientes al factor de separación del etanol y la composición del etanol en la corriente de cimbras en el experimento de destilación normal realizando variaciones en la etapa de alimentación de la mezcla problema. Datos tomados de la simulación en Aspen Plus realizada por los autores.

Como se evidencia anteriormente, el factor de separación y la composición de etanol es mayor realizando la alimentación en la etapa 2 y en la etapa 3 de la columna de destilación. Realizar la alimentación en las etapas 1 y 6 disminuye el factor de separación del producto deseado. Por esta razón se concluye que en los experimentos de destilación normal en donde no se hace uso de solvente la alimentación se debe realizar en las etapas centrales de la columna de destilación.

Por consiguiente, se realiza el análisis de sensibilidad de la razón de reflujo de la columna de destilación, se realizan variaciones entre una razón de reflujo de 0,5 a 5, se evidencia que los valores de la composición del etanol en la corriente de cimbras S4 y el flujo de salida de esta no presentan variaciones significativas, por esta razón se concluye que las variaciones en la razón de reflujo solo generarían variaciones en los costos energéticos del condensador.

Por otro lado, se realiza un análisis de sensibilidad teniendo en cuenta la presión de operación de la columna, se debe tener en cuenta que la presión de alimentación de la mezcla problema es de 1 bar, se realizan variaciones de la presión entre 1 a 3 bar, se evidencia que a una presión de 3 bar la simulación no converge debido a que se presenta una diferencia de presiones en cuanto a la presión

de entrada y la presión de operación de la columna que hacen que la mezcla problema se concentre en fase vapor, imposibilitando la separación por fondos.

Por último se realiza un análisis de sensibilidad de la temperatura de entrada de la columna realizando variaciones en las especificaciones del intercambiador de calor HE-102, durante el funcionamiento de la columna se pueden realizar variaciones de las condiciones de operación de la utilidad empleada en dicho intercambiador, realizando cambios en la caldera de calentamiento del vapor, con estas variaciones se evidencia que el factor de separación del etanol y la composición del etanol en la corriente de cimbras no presentan cambios significativos, sin embargo, generaría aumento en los costos correspondientes a los servicios auxiliares como el vapor de calentamiento y el consumo energético del intercambiador de calor debido a que si se requiere entrada de una corriente a mayor temperatura requiere mayor ingreso de energía, por otro lado, si la corriente ingresa a una temperatura menor se verían afectados los tiempos de residencia de la columna de destilación debido a que tomaría más tiempo llegar a una temperatura cercana al punto de burbuja del etanol para generar la separación.

7.3.2. Análisis de sensibilidad correspondiente a destilación extractiva

En el experimento de destilación extractiva se realiza un análisis de sensibilidad teniendo en cuenta las variables criterio que afectan el factor de separación de la torre de destilación, la composición del producto deseado en la corriente de cima, en este caso etanol, el flujo del mismo en cimbras, los costos de servicios auxiliares y las temperaturas de las corrientes de salida de la torre de destilación de modo que sean tenidos en cuenta al momento del arranque de la torre de destilación específicamente en la ejecución de los experimentos de destilación extractiva.

Inicialmente se realiza un análisis de sensibilidad efectuando variaciones en la etapa de alimentación de la mezcla problema y del solvente empleado, teniendo en cuenta que la torre cuenta con 6 etapas se realiza un análisis en cuanto al factor de separación de etanol y la composición de etanol en la corriente de cimbras S7, esto se evidencia en la Tabla 19 a continuación.

Tabla 19.

Análisis de sensibilidad de la etapa de alimentación correspondiente al experimento de destilación extractiva.

Etapa de alimentación del etilenglicol	Etapa de alimentación de la mezcla problema	Composición másica del etanol en la corriente S7	Factor de separación de etanol
3	6	0,469065	0,997678
2	6	0,469065	0,997678
1	6	0,468474	0,996994
3	5	0,470924	0,999894
3	4	0,471042	1
2	5	0,470924	0,999894

Nota: Se evidencia en la tabla los valores correspondientes al factor de separación del etanol y la composición del etanol en la corriente de cimbras en el experimento de destilación extractiva realizando variaciones en la etapa de alimentación de la mezcla problema y del solvente. Datos tomados de la simulación en Aspen Plus realizada por los autores.

Como se evidencia anteriormente, el factor de separación y la composición de etanol es mayor realizando la alimentación del solvente en la etapa 3 y la alimentación de la mezcla problema en la etapa 4 o 5 de la columna de destilación. Como se evidenció en el análisis de destilación normal, igualmente se evidencia que realizar la alimentación en las etapas 1 y 6 disminuye el factor de separación del producto deseado. Por esta razón se concluye que en los experimentos de destilación extractiva se debe realizar la alimentación del solvente y de la mezcla en etapas centrales de la columna

Por consiguiente, se realiza el análisis de sensibilidad correspondiente a la razón de reflujo de la columna de destilación y de esta manera evidenciar las variaciones en la composición del etanol en la corriente de cimbras y el flujo de salida de dicha corriente, esto se evidencia en la Tabla 20 a continuación.

Tabla 20.

Análisis de sensibilidad de la razón de reflujo correspondiente al experimento de destilación extractiva.

Razón de reflujo	Composición másica del etanol en la corriente S7	Flujo de etanol en la corriente S7 (kg/hr)
0,5	0,466372	1001,64
1	0,467838	1003,34
1,5	0,468598	1004,22
2	0,469065	1004,76
2,5	0,469382	1005,14
3	0,469611	1005,4

Nota: Se evidencia en la tabla los valores correspondientes al flujo de etanol y la composición del etanol en la corriente de cimas en el experimento de destilación extractiva realizando variaciones en la razón de reflujo de la columna de destilación. Datos tomados de la simulación en Aspen Plus realizada por los autores

Como se evidencia en la tabla anterior se puede concluir que una razón de reflujo mayor al permitir que el material de cimas regrese a la columna de destilación para que sea destilada nuevamente permite que en cimas se produzca más etanol debido a que se realiza una separación con mayor eficiencia.

Adicionalmente se realiza un análisis de sensibilidad con respecto a la presión de operación de la columna de forma que se analice la afectación con respecto a la composición y flujo de etanol en la corriente de cimas S7 y las temperaturas de las corrientes de cimas (S7) y de fondos (S9). La información registrada se evidencia en la Tabla 21 a continuación.

Tabla 21.

Análisis de sensibilidad de la presión de operación de la columna de destilación correspondiente al experimento de destilación extractiva.

Presión de la columna (bar)	Composición de etanol en la corriente de cimas	Flujo de etanol en la corriente de cimas (kg/hr)	Temperatura de cimas (°C)	Temperatura de fondos (°C)
2	0,469065	1004,76	181,243	212,206
2,5	0,469381	1005,13	181,196	213,596
3	0,469611	1005,4	181,168	214,622
3,5	0,469785	1005,61	181,147	215,408
4	0,469922	1005,77	181,13	216,029

Nota: Se evidencia en la tabla los valores correspondientes a la composición y el flujo de etanol en la corriente de cimas, junto con las variaciones de la temperatura tanto en la corriente de cimas como en la corriente de fondos en el experimento de destilación extractiva variando los valores de la presión de trabajo de la torre de destilación. Datos tomados de la simulación en Aspen Plus realizada por los autores

Por lo evidenciado anteriormente se evidencia que, al aumentar la presión de operación de la columna, la mezcla problema se concentra mayoritariamente en vapor lo que genera que la composición de etanol en la corriente de cimas sea mayor al igual que el flujo de este. Evidentemente dichos cambios en las condiciones de operación van a generar aumentos en los costos del consumo energético de la torre.

Por último, se realiza un análisis de sensibilidad de la temperatura de entrada de la columna realizando variaciones en las especificaciones del intercambiador de calor HE-101 y HE-102, durante el funcionamiento de la columna se pueden realizar variaciones de las condiciones de operación de la utilidad empleada en dicho intercambiador realizando cambios en la caldera de calentamiento del vapor. Con estas variaciones se evidencia que el factor de separación del etanol, la composición del etanol en la corriente de cimas y el flujo del mismo, no presentan cambios significativos, sin embargo, generaría aumento en los costos correspondientes a los servicios auxiliares como el vapor de calentamiento y el consumo energético de los intercambiadores de

calor debido a que si se requiere entrada de una corriente a mayor temperatura requiere mayor ingreso de energía, por otro lado, si la corriente ingresa a la columna a una temperatura menor se verían afectados los tiempos de residencia de la columna de destilación debido a que tomaría más tiempo llegar a una temperatura cercana al punto de burbuja del etanol para generar la separación.

7.3.3. Análisis de sensibilidad correspondiente a destilación azeotrópica

En el experimento de destilación azeotrópica se realiza un análisis de sensibilidad teniendo en cuenta las variables criterio que afectan el factor de separación de la torre de destilación, la composición del producto deseado en la corriente de cima, en este caso acetato de isobutilo y en la corriente de fondos siendo ácido acético, el flujo de estos en las corrientes de salida, los costos de servicios auxiliares y las temperaturas de las corrientes de salida de la torre de destilación de modo que sean tenidos en cuenta al momento del arranque de la torre de destilación específicamente en la ejecución de los experimentos de destilación azeotrópica.

Inicialmente se realiza un análisis de sensibilidad efectuando variaciones en la etapa de alimentación de la mezcla problema y del solvente empleado, teniendo en cuenta que la torre cuenta con 6 etapas se realiza un análisis en cuanto al factor de separación de etanol y la composición de etanol en la corriente de cimbras S5, esto de evidencia en la Tabla 22 a continuación

Tabla 22.

Análisis de sensibilidad de la etapa de alimentación correspondiente al experimento de destilación azeotrópica.

Etapa de alimentación del acetato de isobutilo	Etapa de alimentación de la mezcla problema	Flujo del acetato de isobutilo en cimas S5 (kg/hr)	Factor de separación del acetato de isobutilo
4	3	17,2395	0,986076
5	3	16,2573	0,929895
6	3	14,3077	0,818384
4	2	17,1411	0,980452
5	2	15,9509	0,912376
6	1	4,26442	0,243919

Nota: Se evidencia en la tabla los valores correspondientes al factor de separación del acetato de isobutilo y el flujo de este en la corriente de cimas en el experimento de destilación azeotrópica realizando variaciones en la etapa de alimentación de la mezcla problema y del solvente. Datos tomados de la simulación en Aspen Plus realizada por los autores.

Como se evidencia anteriormente, el factor de separación y el flujo de acetato de isobutilo es mayor realizando la alimentación del solvente en la etapa 4 y la alimentación de la mezcla problema en la etapa 3 o 2 de la columna de destilación. Como se evidenció en el análisis de destilación normal y extractiva, igualmente se evidencia que realizar la alimentación en las etapas 1 y 6 disminuye drásticamente el factor de separación del producto deseado. Por esta razón se concluye que en los experimentos de destilación azeotrópica se debe realizar la alimentación del solvente y de la mezcla en etapas centrales de la columna.

Por consiguiente, se realiza el análisis de sensibilidad correspondiente a la razón de reflujo de la columna de destilación y de esta manera evidenciar las variaciones en la composición del ácido acético en la corriente de fondos (S7) y el flujo de salida de dicha corriente, esto se evidencia en la Tabla 23 a continuación.

Tabla 23.

Análisis de sensibilidad de la razón de reflujo correspondiente al experimento de destilación azeotrópica

Razón de reflujo	Composición másica del ácido acético en la corriente S7	Flujo de ácido acético en la corriente S7 (kg/hr)
0,2	0,839523	17,3417
0,5	0,869928	17,9874
1	0,895508	18,5336
1,5	0,908511	18,815
2	0,916466	18,9894

Nota: Se evidencia en la tabla los valores correspondientes al flujo de ácido acético y la composición de este en la corriente de fondos en el experimento de destilación azeotrópica realizando variaciones en la razón de reflujo de la columna de destilación. Datos tomados de la simulación en Aspen Plus realizada por los autores

Como se evidencia en la tabla anterior se puede concluir que una razón de reflujo mayor al permitir que el material de cimbras regrese a la columna de destilación para que sea destilada nuevamente permite que en fondos se genere más ácido acético debido a que se realiza una separación del azeótropo con mayor eficiencia. Adicionalmente se realiza un análisis de sensibilidad con respecto a la presión de operación de la columna y su afectación a la composición y flujo del acetato de isobutilo en la corriente de cimbras S5 y las temperaturas de las corrientes de cimbras (S5) y de fondos (S7). La información registrada se evidencia en la Tabla 24 a continuación.

Tabla 24.

Análisis de sensibilidad de la presión de operación de la columna de destilación correspondiente al experimento de destilación extractiva.

Presión de la columna (bar)	Composición del acetato de isobutilo en la corriente S5	Flujo del acetato de isobutilo en la corriente S5 (kg/hr)	Temperatura de cimbras (°C)	Temperatura de fondos (°C)
1	0,370946	17,2395	100,307	108,95
0,8	0,371657	17,2721	94,0922	102,174

0,6	0,372412	17,3071	86,4212	93,8459
0,4	0,373279	17,3478	76,2109	82,8192
0,2	0,374453	17,4044	60,2067	65,6596

Nota: Se evidencia en la tabla los valores correspondientes a la composición y el flujo de acetato de isobutilo en la corriente de cimbras, junto con las variaciones de la temperatura tanto en la corriente de cimbras como en la corriente de fondos en el experimento de destilación azeotrópica variando los valores de la presión de trabajo de la torre de destilación. Datos tomados de la simulación en Aspen Plus realizada por los autores

Por lo evidenciado anteriormente se evidencia que, al disminuir la presión de operación de la columna, la composición y el flujo del acetato de isobutilo aumenta, por el contrario las temperaturas de las corrientes de salida de la columna disminuye, lo cual genera un problema debido a que existe mayor riesgo de que exista un cambio de fase en las tuberías o transporte hacia los tanques colectores, por esta razón se concluye que en el caso de los experimentos de destilación azeotrópica se debe manejar una presión de 1 bar en la columna de separación, de manera que se obtenga la separación y se aseguren las fases de trabajo de los componentes de la mezcla problema. Evidentemente dichos cambios en las condiciones de operación van a generar aumentos en los costos del consumo energético de la torre.

Por último, se realiza un análisis de sensibilidad de la temperatura de entrada de la columna realizando variaciones en las especificaciones del intercambiador de calor HE-101 y HE-102, durante el funcionamiento de la columna se pueden realizar variaciones de las condiciones de operación de la utilidad empleada en dicho intercambiador realizando cambios en la caldera de calentamiento del vapor. Con estas variaciones se evidencia que el factor de separación del acetato de isobutilo, su composición en la corriente de cimbras y el flujo del mismo, no presentan cambios significativos, sin embargo, generaría aumento en los costos correspondientes a los servicios auxiliares como el vapor de calentamiento y el consumo energético de los intercambiadores de calor debido a que si se requiere entrada de una corriente a mayor temperatura requiere mayor ingreso de energía, por otro lado, si la corriente ingresa a la columna a una temperatura menor se verían afectados los tiempos de residencia de la columna de destilación debido a que tomaría más tiempo llegar a una temperatura cercana al punto de burbuja del etanol para generar la separación.

7.3.4. Análisis de sensibilidad correspondiente a absorción física I

En el primer experimento de absorción física se realiza un análisis de sensibilidad identificando las variables criterio las cuales afectan de manera directa o indirecta el factor de separación de la torre de absorción, la composición del producto a retirar del gas en la corriente de cimbras, en este caso de dióxido de azufre, los costos de los servicios auxiliares y el valor máximo que pueden tomar ciertas variables dentro de la unidad y asimismo determinar los límites de operación de la misma, de forma que estos sean aplicables y considerados en el arranque de cada uno de los equipos de la unidad de absorción de gases, al igual que en el uso continuo.

Inicialmente se realiza un análisis de sensibilidad realizando variaciones en la presión de trabajo de la torre de absorción, analizando los cambios en la composición y el flujo del componente a separar, es decir, de dióxido de azufre en la corriente de cimbras (S5) y la influencia del cambio de presión en los cambios de temperatura de los productos tanto de cimbras (S5) como de fondos (S6). La información compilada se evidencia en la Tabla 25 a continuación.

Tabla 25.

Análisis de sensibilidad de la presión de trabajo de la columna de absorción correspondiente al primer experimento de absorción física.

Presión en la columna (bar)	Composición de SO ₂	Flujo de SO ₂	Temperatura de cimbras (°C)	Temperatura de fondos (°C)
1	0,00011689	0,024401	20,1101	26,4
1,5	1,02E-05	0,00209956	20,1012	26,7397
2	1,81E-06	0,000368636	20,1014	26,9051
2,5	NO CONVERGE	NO CONVERGE	NO CONVERGE	NO CONVERGE

Nota: Se evidencia en la tabla los valores correspondientes a la composición y el flujo de dióxido de azufre en la corriente de cimbras, junto con las variaciones de la temperatura tanto en la corriente de cimbras como en la corriente de fondos en el primer experimento de absorción física variando los

valores de la presión de trabajo de la torre de absorción. Datos tomados de la simulación en Aspen Plus realizada por los autores

Como se evidencia anteriormente, la composición y el flujo de dióxido de azufre presente en la corriente de cimbras disminuye conforme se aumenta la presión, por lo que se puede afirmar que se realiza una mejor separación con una presión más alta. Sin embargo, de igual manera con valores superiores a 2 bar la torre no converge, esto se debe a que se debe aumentar la presión de los equipos antes de la torre de absorción, es decir, de la bomba (P-101) y el compresor (C-101) para que la presión de alimentación no sea menor a la presión de funcionamiento de la torre. Este aumento de presión repercute directamente en el aumento de los costos de operación de la unidad, teniendo en cuenta que aumentan los servicios auxiliares, en especial la electricidad necesitada por los equipos para aumentar las condiciones de operación.

Con respecto a las temperaturas de las corrientes de cimbras y de fondos registradas en la Tabla 25, se identifica que la temperatura en la corriente de fondos aumenta conforme aumenta la presión, mientras que en la corriente de cimbras no se presenta el mismo aumento constante. Esto se debe a la naturaleza de los componentes presentes en cada una de las corrientes.

Por otra parte, se realiza el segundo análisis de sensibilidad variando la presión de trabajo de la bomba (P-101), analizando si se presenta un cambio en la composición de la corriente de salida (S5) correspondiente a la corriente cimbras, en cuanto a la presencia de dióxido de azufre. La información recolectada se evidencia en la Figura 33 a continuación.

Figura 33.

Tabla correspondiente al análisis de sensibilidad de la presión de trabajo de la bomba (P-101) correspondiente al primer experimento de absorción física.

Row/Case	Status	VARY 1 P-101 PARAM PRES BAR	XSO2S5
1	OK	2	1,81195e-06
2	OK	2,5	1,8278e-06
3	OK	3	1,84363e-06
4	OK	3,5	1,85959e-06
5	OK	4	1,87569e-06
6	OK	4,5	1,89191e-06
7	OK	5	1,90828e-06

Nota: Se evidencia los valores correspondientes a la composición de dióxido de azufre en la corriente de cimas (S5) en el primer experimento de absorción física realizando variaciones en la presión de trabajo de la bomba (P-101). Datos tomados de la simulación en Aspen Plus realizada por los autores.

Como se evidencia anteriormente, la composición de la corriente de salida de cimas (S5) con respecto al aumento en la presión de trabajo de la bomba (P-101) presenta un pequeño aumento en cuanto a la presencia en la composición másica de dióxido de azufre. Esto se debe a que por el aumento de la presión de operación de la columna hace que la mezcla problema se concentre en fase vapor aumentando la concentración del dióxido de azufre ya que este es el componente más volátil de la mezcla.

Por último, se realiza el tercer análisis de sensibilidad variando la presión de trabajo del compresor (C-101) analizando si se presenta un cambio en la composición de la corriente de salida (S5) correspondiente a la corriente cimas, en cuanto a la presencia de dióxido de azufre. La información recolectada se evidencia en la Figura 34 a continuación.

Figura 34.

Tabla correspondiente al análisis de sensibilidad de la presión de trabajo del compresor (C-101) correspondiente al primer experimento de absorción física.

	Row/Case	Status	VARY 1 C-101 PARAM PRES BAR	XSO2S5
▶	1	OK	2	1,81187e-06
▶	2	OK	2,5	1,89321e-06
▶	3	OK	3	1,96647e-06
▶	4	OK	3,5	2,03349e-06
▶	5	OK	4	2,09567e-06
▶	6	OK	4,5	2,15398e-06
▶	7	OK	5	2,20908e-06

Nota: Se evidencia los valores correspondientes a la composición de dióxido de azufre en la corriente de cimás (S5) en el primer experimento de absorción física realizando variaciones en la presión de trabajo del compresor (C-101). Datos tomados de la simulación en Aspen Plus realizada por los autores.

Como se evidencia anteriormente, la composición de la corriente de salida de cimás (S5) con respecto al aumento en la presión de trabajo del compresor (C-101) presenta un más significativo conforme al aumento en cuanto a la presencia en la composición másica de dióxido de azufre. Esto se debe a que el aumento de presión incrementa el movimiento de las partículas presentes en el gas por lo cual, si el solvente no presenta condiciones similares es más complejo poder separar el componente deseado y asimismo aumenta su presencia en la corriente de gas purificado.

En conclusión, el aumento de presión de trabajo en los equipos, en especial en la torre de absorción genera una mejor separación y purificación del gas en cuestión, Sin embargo, esto repercute directamente en un aumento significativo en cuanto a los costos de operación de los equipos, es decir, requieren de un mantenimiento más constante para preservar el buen estado de los mismos

y se presentan aumento en los servicios auxiliares, ya que los equipos requieren más energía para poder cumplir con la variable de operación especificada por el operario.

De igual manera se recomienda que los dos equipos correspondientes a los cambios de presión en los fluidos de alimentación manejen presiones similares para mejorar la purificación del gas teniendo en cuenta que si aumenta la presión en estos equipos necesariamente debe aumentar el rango de variación de la presión de trabajo de la torre de absorción.

7.3.5. Análisis de sensibilidad correspondiente al segundo experimento de absorción física

En el primer experimento de absorción física se realiza un análisis de sensibilidad identificando las variables criterio las cuales afectan de manera directa o indirecta el factor de separación de la torre de absorción, la composición del producto a retirar del gas en la corriente de cimas, en este caso es el amoniaco, los costos de los servicios auxiliares y el valor máximo que pueden tomar ciertas variables dentro de la unidad y asimismo determinar los límites de operación de la misma, de forma que estos sean aplicables y considerados en el arranque de cada uno de los equipos de la unidad de absorción de gases, al igual que en el uso continuo.

Inicialmente se realiza un análisis de sensibilidad realizando variaciones en la presión de trabajo de la torre de absorción, analizando los cambios en la composición y el flujo del componente a separar, es decir, de amoniaco en la corriente de cimas (S5) y la influencia del cambio de presión en los cambios de temperatura de los productos tanto de cimas (S5) como de fondos (S6). La información compilada se evidencia en la Tabla 26 a continuación.

Tabla 26.

Análisis de sensibilidad de la presión de trabajo de la columna de absorción correspondiente al primer experimento de absorción física.

Presión en la columna (bar)	Composición de NH3	Flujo de NH3 (kg/hr)	Temperatura de cimas (°C)	Temperatura de fondos (°C)
1	2,22E-15	1,56E-13	20,8235	26,0071
1,5	2,85E-16	1,91E-14	20,8308	26,0723
2	6,29E-17	4,00E-15	20,8328	26,107
2,5	1,89E-17	1,14E-15	20,8319	26,1267
3	6,99E-18	4,01E-16	20,8299	26,1391

Nota: Se evidencia en la tabla los valores correspondientes a la composición y el flujo de amoniaco en la corriente de cimas, junto con las variaciones de la temperatura tanto en la corriente de cimas como en la corriente de fondos en el primer experimento de absorción física variando los valores de la presión de trabajo de la torre de absorción. Datos tomados de la simulación en Aspen Plus realizada por los autores

Como se evidencia anteriormente, la composición y el flujo de amoniaco presente en la corriente de cimas disminuye conforme se aumenta la presión, por lo que se puede afirmar que se realiza una mejor separación con una presión más alta. Cabe resaltar que en este caso la bomba y el compresor instalados previamente trabajan con una presión de 11 bar por efectos del experimento, por lo cual la torre funciona con presiones inferiores a 11 bar. Si se requiere que la unidad trabaje a presiones superiores a la mencionada anteriormente para este experimento se debe aumentar las presiones de la bomba y el compresor con el fin de evitar que la mezcla problema se concentre en fase vapor y se dificulte la separación.

Este aumento de presión repercute directamente en el aumento de los costos de operación de la unidad, teniendo en cuenta que aumentan los servicios auxiliares, en especial la electricidad necesitada por los equipos para aumentar las condiciones de operación y para que la separación se lleve a cabo de manera exitosa.

Con respecto a las temperaturas de las corrientes de cimbras y de fondos registradas en la Tabla 26, se identifica que la temperatura en la corriente de fondos aumenta conforme aumenta la presión, mientras que en la corriente de cimbras no se presenta el mismo aumento constante. Esto se debe a la naturaleza de los componentes presentes en cada una de las corrientes.

Por otra parte, se realiza el segundo análisis de sensibilidad variando la presión de trabajo de la bomba (P-101), analizando si se presenta un cambio en la composición de la corriente de salida (S5) correspondiente a la corriente cimbras, en cuanto a la presencia de amoníaco. La información recolectada se evidencia en la Tabla 27 a continuación.

Tabla 27.

Tabla correspondiente al análisis de sensibilidad de la presión de trabajo de la bomba (P-101) correspondiente al segundo experimento de absorción física.

Presión de bomba (bar)	Composición másica amoníaco
11	2,22E-15
11,5	2,26E-15
12	2,31E-15
12,5	2,36E-15
13	2,42E-15

Nota: Se evidencia los valores correspondientes a la composición de amoníaco en la corriente de cimbras (S5) en el segundo experimento de absorción física realizando variaciones en la presión de trabajo de la bomba (P-101). Datos tomados de la simulación en Aspen Plus realizada por los autores.

Como se evidencia anteriormente, la composición de la corriente de salida de cimbras (S5) con respecto al aumento en la presión de trabajo de la bomba (P-101) presenta un pequeño aumento en cuanto a la presencia en la composición másica de amoníaco. Esto se debe a que por el aumento de la presión de operación de la columna hace que la mezcla problema se concentre en fase vapor aumentando la concentración del amoníaco ya que este es el componente más volátil de la mezcla.

Por último, se realiza el tercer análisis de sensibilidad variando la presión de trabajo del compresor (C-101) analizando si se presenta un cambio en la composición de la corriente de salida (S5) correspondiente a la corriente cimás, en cuanto a la presencia de amoniaco.

En el tercer análisis de sensibilidad no se presentaron cambios significativos con respecto al aumento de la fracción másica de amoniaco en la corriente de cimás, es decir, de aire purificado. Sin embargo, cabe resaltar que el aumento en la presión de trabajo del compresor generaría un aumento de costos correspondientes a los servicios auxiliares, más específicamente la electricidad ya que el equipo requiere de un mayor consumo energético.

En conclusión, el aumento de presión de trabajo en los equipos, en especial en la torre de absorción genera una mejor separación y purificación del gas en cuestión, Sin embargo, esto repercute directamente en un aumento significativo en cuanto a los costos de operación de los equipos, es decir, requieren de un mantenimiento más constante para preservar el buen estado de los mismos y se presentan aumento en los servicios auxiliares, ya que los equipos requieren más energía para poder cumplir con la variable de operación especificada por el operario.

De igual manera se recomienda que los dos equipos correspondientes a los cambios de presión en los fluidos de alimentación manejen presiones similares para mejorar la purificación del gas teniendo en cuenta que si aumenta la presión en estos equipos necesariamente debe aumentar el rango de variación de la presión de trabajo de la torre de absorción.

En cuanto a los costos evidenciados en las simulaciones cabe destacar que al ser simulaciones a nivel de ingeniería conceptual no se realiza el análisis de sensibilidad empleando las dimensiones reales de los equipos presentes en CEPURE, lo cual permite concluir que los costos por servicios auxiliares y costos energéticos van a disminuir drásticamente implementando las configuraciones exactas de cada uno de los mismos. Adicionalmente los costos presentados para cada una de las configuraciones de trabajo son tomados del software Aspen Plus V11 el cual realiza una estimación de los costos teniendo en cuenta un uso continuo de las unidades, lo que adicionalmente permite concluir que efectivamente los costos van a ser mucho menores para el caso del Centro de Procesos de la Universidad de América.

8. CONCLUSIONES

Con base en las características de fabricación de las unidades de destilación continua y absorción de gases se debe limitar el uso de ciertos ácidos orgánicos, acetatos y cloruros debido a los ambientes salinos y las soluciones de cloruro que generan corrosión por picadura tanto en los equipos como en las tuberías.

Por otro lado, las variables de criterio tales como temperatura, presión, flujo y nivel son las variables críticas de operación y de seguridad de todos los equipos presentes en las unidades, por lo que se deben respetar los límites de operación de estos y analizar y monitorear constantemente el funcionamiento de las unidades identificando posibles anomalías en su funcionamiento a través de los instrumentos de medición.

Es fundamental para el arranque y puesta en marcha de las unidades de destilación y absorción tener un conocimiento profundo correspondiente a los equipos y componentes de cada una de estas, se debe contar con el manual de operación a la mano antes de realizar las pruebas iniciales de tal manera que todos los instrumentos como válvulas, termocuplas, toma muestras y equipos sean ensayados y previamente revisados para asegurar un arranque y una puesta en marcha satisfactoria.

Además, el manual de usuario presente durante el arranque y el conocimiento completo de las unidades de proceso permite evitar problemas futuros en cuanto a mantenimientos o pruebas inesperadas que no se realizaron en su momento deteniendo la posibilidad de que los estudiantes hagan uso de las unidades. Se realizan guías anexas al presente documento correspondientes al paso a paso para la realización de la puesta en marcha de los equipos.

Los parámetros operativos y de seguridad de cada una de las unidades deben ser acordes con lo estipulado por el proveedor ya que de estos depende el buen funcionamiento de CEPURE, debido a que estos garantizan los requerimientos mínimos de las unidades y de igual manera priorizan la salud en el trabajo mediante las operaciones.

Se debe realizar control, inspección y comprobación del estado estructural de cada uno de los equipos para garantizar el adecuado funcionamiento de estos y de igual manera evitar

acumulaciones indeseadas o la propagación de corrosión en un área específica y así mismo prolongar la vida útil de las unidades y preservar su buen funcionamiento.

Adicionalmente es fundamental realizar inspecciones visuales y lavados de manera interna y externa de forma periódica para identificar posibles fallos a nivel estructural como la corrosión y así mismo descongestionar las unidades de acumulación de sustancias debido al uso constante. Estos dos aspectos preventivos mejoran la vida útil de los equipos y evitan futuros daños.

Se evidencia que, durante el proceso de transporte, izaje, instalación y ensamblaje de las unidades de absorción y destilación se generaron diferentes averías estructurales, sin embargo, se determina que dichas averías no afectan el funcionamiento y la operatividad de las unidades. Aun así, es fundamental realizar el debido mantenimiento y reposición de las barandas y esquinas afectadas durante los procesos mencionados para evitar problemáticas de seguridad a los trabajadores durante el movimiento de las unidades dentro del edificio o de los estudiantes en su uso diario.

Con base en las simulaciones a nivel de ingeniería conceptual con respecto a las condiciones de operación establecidas por el proveedor, se establece que se requieren de grandes cantidades tanto de solvente como de la mezcla problema para observar un factor de separación alto y asimismo optimizar la eficiencia de las unidades, esto teniendo en cuenta las capacidades máximas de los tanques de almacenamiento de mezcla problema y de solvente.

Por otro lado, si se opera a bajas temperaturas y presiones en las corrientes de entrada a las columnas se aumenta el factor de separación del producto deseado y se disminuye el consumo energético en los equipos iniciales de las unidades, es decir, en los intercambiadores de calor, la bomba y el compresor, sin embargo, esto generaría un aumento en el tiempo de residencia de las sustancias dentro de las columnas, debido a que estas requieren de más tiempo para alcanzar las composiciones deseadas en cimas y en fondos.

Además, es imprescindible considerar que los aumentos en las condiciones de operación de los equipos y los cambios en la razón de reflujo de la columna de destilación se ven directamente reflejados en un aumento en los costos de operación, de mantenimiento y de servicios auxiliares.

En cuanto a los experimentos a realizar en la unidad de absorción de gases se requiere de una mayor cantidad de flujo de la mezcla de gases a purificar en contraste con la necesitada de solvente para evidenciar una separación satisfactoria. Por parte de la unidad de destilación continua, para obtener un mayor factor de separación y una mejor composición del producto deseado se deben ubicar las corrientes de alimentación en la parte central de la columna, es decir, en la segunda sección de esta.

Para las dos unidades tomadas como objeto de ensayo se identificó que las presiones de las corrientes de entrada a las columnas deben ser cercanas a la presión de operación de esta para que no se presenten cambios de presión abruptos y así mismos fallos a corto, mediano y largo plazo en las juntas y soldaduras.

Se concluye que el presente proyecto de grado fue llevado a cabo satisfactoriamente, se cumplieron los objetivos planteados y se presentan como anexos unas guías que indican el paso a paso para la realización de la puesta en marcha y validación de cada uno de los equipos con el objetivo de contar con un apoyo pedagógico e instructivo, adicional a los manuales de operación brindados por el proveedor, para el momento en que se realicen en sitio dichos procesos mencionados anteriormente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio del Poder Popular de Petróleo, “Refinación,” 2016.
http://www.pdvsa.com/index.php?option=com_content&view=article&id=8841&Itemid=584&lang=es.
- [2] K. Barry, “Separation and Purification,” *Britannica*. [Online]. Available:
<https://www.britannica.com/science/separation-and-purification>.
- [3] A. Jiménez Gutiérrez, *Diseño de Procesos en Ingeniería Química*. 2003.
- [4] Fondo Social Europeo dentro del Programa Operativo Lucha contra la Discriminación, “Plan de Puesta en Marcha,” *Vives Proy.*, 2013.
- [5] H. Alamo and J. M. Storch de Gracia, “Puesta en Marcha y Entrega de Plantas Químicas y Petroleras (II). La puesta en marcha como sucesión de etapas: Puesta en marcha y entrega definitiva.,” p. 395, 2002.
- [6] Quality By Design, “Conoce las etapas de la Validación de Procesos,” 2023.
<https://www.qbd.lat/etapas-de-validacion-de-procesos/?v=42983b05e2f2>.
- [7] S. G. Ana María, “Técnicas de Mantenimiento Predictivo. Metodología de Aplicación en las Organizaciones,” Universidad Católica de Colombia, 2017.
- [8] S. J.D., E. Henley, and K. Roper D, *Separation Process Principles. Chemical and Biochemical Operations*. 2011.
- [9] A. Marcilla, *Introducción a las operaciones de separación. Cálculo por etapas de equilibrio*. 1998.
- [10] Process Solutions and Equipment, “Planta de Destilación Continua (Control Manual),” pp. 1–13, 2021.
- [11] Process Solutions and Equipment, “Manual de Operación. Planta de Destilación Continua,” p. 57, 2018.
- [12] Z. Lei, *Azeotropic Distillation*. Elsevier Inc., 2017.
- [13] S. Sun, L. Lü, A. Yang, S. Wei, and W. Shen, “Extractive distillation: Advances in conceptual design, solvent selection, and separation strategies,” *Chinese J. Chem. Eng.*, vol. 27, no. 6, pp. 1247–1256, 2019, doi: 10.1016/j.cjche.2018.08.018.
- [14] W. L. Luyben, “Importance of pressure-selection in pressure-swing distillation,” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 149, p. 107279, 2021, doi: 10.1016/j.compchemeng.2021.107279.
- [15] T. Robert, *Operaciones De Transferencia*. .

- [16] Process Solutions and Equipment, “Planta de absorción de gases (Control Manual),” 2021.
- [17] Process Solutions and Equipment, “Manual de operación. Planta de Absorción de Gases,” p. 37, 2018.
- [18] Ensinger Indústria Plásticos Técnicos Ltda. Rua, “TECAFLON PTFE natural - División de semielaborados.” Sao Leopoldo - RS, p. 1, 2020.
- [19] ELAPLAS, “PTFE Politetrafluoroetileno,” 2021.
<https://www.elaplas.es/materiales/plasticos-tecnicos/politetrafluoroetileno-ptfe/>.
- [20] The Chemours Company, “Fluoropolímeros Teflon en la industria química,” 2022.
<https://www.teflon.com/es/industries-and-solutions/industries/industrial-manufacturing/chemical-industry#:~:text=Las resinas Teflon™ PFA y PTFE proporcionan un revestimiento,protegen la pureza del producto.>
- [21] J. Orozco, “Clasificación de Aceros Inoxidables de acuerdo con la norma AISI,” 2019. .
- [22] PALSA. Materiales Construcción S.L., “Ficha Tecnica Acero Inoxidable AISI 304.” p. 2.
- [23] Carbone Stainless Steel, “Ficha técnica del Acero Inoxidable.” p. 6.
- [24] M. O. Garcia Falcon, “Teflon Propiedades y Usos en la Industria Química,” Universidad Nacional Autonoma de Mexico, 1990.
- [25] Vacuubrand, “Tabla de compatibilidad química,” pp. 1–2, 2019, [Online]. Available: https://www.vacuubrand.com/context/brochures/es/Flyer_ChemistryCompatibility_ES_SCREEN.pdf.
- [26] M. V. Ultrilla Esteban, *Estudio de la Resistencia a la Corrosión en Distintos Medios Agresivos de los aceros inoxidable AISI 304L y 316L preparados por vía Pulvimetalúrgica*. Madrid, 1995.
- [27] Industrial Hydraulics Products, “Guía de Resistencias Químicas,” p. 8, 2012.
- [28] M. de la C. Pedro J and R. M. Eloísa, *Operaciones de Separación en Ingeniería Química*. Madrid, 2004.
- [29] P. Chiesa and S. Consonni, “Shift reactors and physical absorption for low-CO2 emission IGCCs,” *Proc. ASME Turbo Expo*, vol. 3, no. 98, 1998, doi: 10.1115/98-GT-396.
- [30] M. Wang, A. Lawal, P. Stephenson, J. Sidders, and C. Ramshaw, “Post-combustion CO2 capture with chemical absorption: A state of the art review,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 89, no. 9, pp. 1609–1624, 2011, doi: 10.1016/j.cherd.2010.11.005.

- [31] N. H. Sergio Jesús and P. O. de Castro, “Control de Columnas de Destilación,” p. 98, 2014.
- [32] M. E. Velandia and M. S. Vargas Jimenez, “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,” 2022.
- [33] H. Alamo and J. M. Storch de Gracia, “Puesta en Marcha y Entrega de Plantas Químicas y Petroleras (III). Otros aspectos no secuenciales,” p. 395, 2002.
- [34] Process Solutions and Equipment, “Requerimientos de instalación y operación,” 2018.
- [35] E. F. Barba Avila, “Pre-comisionamiento y Comisionamiento del Prototipo de la Planta de Destilación construida en la Universidad Pontificia Bolivariana,” Universidad Pontificia Bolivariana, 2019.
- [36] Aspen Technology Inc, “Aspen Tech,” 2022.
<https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspens-plus>.
- [37] E. Carlson, “Don’t Gamble With Physical properties For Simulations,” p. 12, 1996.

ANEXOS

ANEXO 1.

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN CORRESPONDIENTE A LA CONFIGURACIÓN DESTILACIÓN NORMAL

Tabla 28.

Resultados simulación destilación normal.

Nombre de la Corriente	Unidades	Material								
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	U1	U2
Desde			P-101	HE-102	C-101	HE-104	C-101	HE-105		HE-102
Para		P-101	HE-102	C-101	HE-104		HE-105		HE-102	
Clase de corriente		CONVEN								
Fase		Líquida	Líquida	Líquida	Vapor	Líquida	Líquida	Líquida	Vapor	
Temperatura	C	20	20	65	81	25	100	25	160	160
Presión	bar	1	2	2	1	1	1	1	6	6
Fración molar de vapor		0	0	0	1	0	0	0	1	0,945778
Fración molar líquida		1	1	1	0	1	1	1	0	0,0542221
Fración molar de solido		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fración másica de vapor		0	0	0	1	0	0	0	1	0,945778
Fración másica de liquido		1	1	1	0	1	1	1	0	0,0542221
Fración másica de solido		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Entalpía molar	cal/mol	-67816,8	-67814,5	-66838,4	-56066,1	-67132,6	-66892,5	-68262,3	-56728,1	-57213,6
Entalpía másica	cal/gm	-2618,24	-2618,15	-2580,46	-1611,93	-1930,1	-3712,87	-3788,91	-3148,89	-3175,84
Entropía molar	cal/mol-K	-51	-51	-48	-33	-65	-34,89	-39	-11	-12

Entropía mísica	cal/gm-K	-2	-2	-2	-0,943548	-2	-2	-2	-0,625923	-0,688106
Densidad molar	mol/cc	0,034514	0,0345104	0,0325442	3,44E+00	0,0240073	0,05099	0,0551684	0,000177513	0,000187649
Densidad mísica	gm/cc	0,893972	0,893879	0,842949	0,00119713	0,835018	0,918654	0,993934	0,00319794	0,00338055
Flujo de entalpía	cal/sec	-13003,5	-13003,1	-12815,9	-5056,24	-6054,26	-6793,67	-6932,79	-21867,3	-22054,4
Promedio		26	26	26	35	35	18	18	18	18
Flujos molares	kmol/hr	0,690281	0,690281	0,690281	0,324661	0,324661	0,36562	0,36562	1	1
AGUA	kmol/hr	0,49623	0,49623	0,49623	0,130624	0,130624	0,365606	0,365606	1	1
ETANOL	kmol/hr	0,194051	0,194051	0,194051	0,194037	0,194037	1,41E+00	1,41E+00	0	0
Fracciones molares										
AGUA		0,718882	0,718882	0,718882	0,402341	0,402341	0,999962	0,999962	1	1
ETANOL		0,281118	0,281118	0,281118	0,597659	0,597659	3,85E+00	3,85E+00	0	0
Flujos másicos	kg/hr	18	18	18	11	11	658.714	7	25	25
AGUA	kg/hr	9	9	9	2	2	658.649	7	25	25
ETANOL	kg/hr	9	9	9	9	893.908	0,000647711	0,000647711	0	0
Fracción másicas										
AGUA		0,5	0,5	0,5	0,208393	0,208393	0,999902	0,999902	1	1
ETANOL		0,5	0,5	0,5	0,791607	0,791607	9,83E+00	9,83E+00	0	0
Flujo volumétrico	l/min	0,333333	0,333368	0,35351	157.214	0,225391	0,119507	0,110456	130.292	123.254

Nota: Se evidencia la tabla completa de los resultados de la simulación correspondiente al experimento de destilación normal. Se puede evidenciar el documento de Aspen Plus en:

<https://drive.google.com/drive/folders/1iYhsfjr0XjcrAfjoaTM0jy9bZFYZxUqB?usp=sharing>

ANEXO 2.

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN CORRESPONDIENTE A LA CONFIGURACIÓN DESTILACIÓN EXTRACTIVA

Tabla 29.

Resultados simulación destilación extractiva.

Nombre de la Corriente	Unidades	Material									
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Desde			P-101	HE-101		P-102	HE-102	C-101	HE-104	C-101	HE-105
Para		P-101	HE-101	C-101	P-102	HE-102	C-101	HE-104		HE-105	
Clase de corriente		CONVEN	CONVEN	CONVEN	CONVEN						
Fase		Líquida	Líquida	Líquida	Líquida	Líquida	Líquida	Vapor	Líquida	Líquida	Líquida
Temperatura	C	20	200.992	65	20	201.076	65	181.243	25	212.206	25
Presión	bar	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2
Fracción molar de vapor		0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Fracción molar líquida		1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
Fracción molar de solido		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fracción másica de vapor		0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Fracción másica de liquido		1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
Fracción másica de solido		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Entalpía molar	cal/mol	-109668	-109664	-108087	-67233,1	-67229,7	-66062,2	-64762,7	-79507,8	-101380	-108816
Entalpía másica	cal/gm	-1766,89	-1766,82	-1741,42	-1913,92	-1913,82	-1880,59	-1511,69	-1855,87	-1647,63	-1768,49
Entropía molar	cal/mol-K	-108.075	-108.065	-103.066	-65	-65	-62	-39	-77	-87	-106,51
Entropía másica	cal/gm-K	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-0,921058	-2	-1	-2

Densidad molar	mol/cc	0,0181031	0,0181016	0,0174382	0,0238909	0,0238875	0,022372	5,38E+00	0,0220262	0,01509	0,01815
Densidad másica	gm/cc	1	1	1	0,839252	0,83913	0,785893	0,0023068	0,943625	0,9287	111.708
Flujo de entalpía	cal/sec	-661776	-661749	-652239	-669276	-669242	-657620	-899482	-	-21290	-228517
									1,10E+11		
Promedio		62	62	62	35	35	35	43	428.411	62	62
Flujos molares	kmol/hr	22	22	22	36	36	36	50	50	8	8
AGUA	kmol/hr	0	0	0	14	14	14	14	139.018	0,0738566	0,07385
ETANOL	kmol/hr	0	0	0	22	22	22	21,81	21,81	0,0507662	0,05076
ETILENGLICOL	kmol/hr	22	22	22	0	0	0	14	14	74	74
Fraciones molares											
AGUA		0	0	0	0,389985	0,389985	0,389985	0,278036	0,278036	0,00976	0,009769
ETANOL		0	0	0	0,610015	0,610015	0,610015	0,436199	0,436199	0,00671	0,006715
ETILENGLICOL		1	1	1	0	0	0	0,285764	0,285764	0,9835	0,983516
Flujos másicos	kg/hr	1348,36	1348,36	1348,36	1258,88	1258,88	1258,88	2142,06	2142,06	465	465
AGUA	kg/hr	0	0	0	252	252	252	250.445	250	1	1
ETANOL	kg/hr	0	0	0	1007,1	1007,1	1007,1	1004,76	1004,76	2	2
ETILENGLICOL	kg/hr	1348,36	1348,36	1348,36	0	0	0	886.847	887	462	462
Fración másicas											
AGUA		0	0	0	0,2	0,2	0,2	0,116918	0,116918	0,00286	0,00286
ETANOL		0	0	0	0,8	0,8	0,8	0,469065	0,469065	0,00502	0,00502
ETILENGLICOL		1	1	1	0	0	0	0,414017	0,414017	0,9921	0,992112
Flujo volumétrico	l/min	20	20	21	25	25	27	38	38	8	8

Nota: Se evidencia la tabla completa de los resultados de la simulación correspondiente al experimento de destilación extractiva. Se puede evidenciar el documento de Aspen Plus en: <https://drive.google.com/drive/folders/1iYhsfjr0XjcrAfjoaTM0jy9bZFYZxUqB?usp=sharing>

ANEXO 3.

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN CORRESPONDIENTE A LA CONFIGURACIÓN DE DESTILACIÓN AZEOTRÓPICA

Tabla 30.

Resultados simulación destilación azeotrópica.

Nombre de la Corriente	Unidades	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Desde			HE-101		HE-102	C-101	HE-104	C-101	HE-105
Para		HE-101	C-101	HE-102	C-101	HE-104		HE-105	
Clase de corriente		CONVEN	CONVEN	CONVEN	CONVEN	CONVEN	CONVEN	CONVEN	CONVEN
Fase		Líquida	Líquida	Líquida	Líquida	Vapor	Líquida	Líquida	Líquida
Temperatura	C	20	90	20	90	100	25	108,95	25
Presión	bar	1	1	1	1	1	1	1	1
Fracción molar de vapor		0	0	0	0	1	0	0	0
Fracción molar líquida		1	1	1	1	0	1	1	1
Fracción molar de solido		0	0	0	0	0	0	0	0
Fracción másica de vapor		0	0	0	0	1	0	0	0
Fracción másica de liquido		1	1	1	1	0	1	1	1
Fracción másica de solido		0	0	0	0	0	0	0	0
Entalpía molar	cal/mol	-128250,0	-124555,0	-81051,6	-79748,9	-71066,8	-81659,5	-92527,8	-94142,4
Entalpía másica	cal/gm	-1104,08	-1072,27	-2609,43	-2567,48	-1968,86	-2262,33	-2066,6	-2102,67
Entropía molar	cal/mol-K	-165397,0	-154188,0	-43994,0	-408608,0	-26665,0	-555307,0	-474337,0	-503326,0

Entropía másica	cal/gm-K	-1	-1	-1	-1	-0,738739	-2	-1	-1
Densidad molar	mol/cc	0,00752535	0,00686963	0,031968	0,0293588	3,22E+00	0,0264659	0,0203815	0,0227592
Densidad másica	gm/cc	0,874145	0,797977	0,992962	0,911917	0,00116248	0,955297	0,912538	1
Flujo de entalpía	cal/sec	-5361,81	-5207,35	-35987	-35408,5	-25417,1	-29205,6	-11858,1	-12065
Promedio		116,16	116,16	31	31	36	36	45	45
Flujos molares	kmol/hr	0,150507	0,150507	2	2	1	1	0,461366	0,461366
AGUA	kmol/hr	0	0	1	1	0,931862	0,931862	0,170494	0,170494
ACIDO ACÉTICO	kmol/hr	0	0	0,496047	0,496047	0,207271	0,207271	0,288776	0,288776
ACETATO DE ISOBUTILO	kmol/hr	0,150507	0,150507	0	0	0,148411	0,148411	0,00209565	0,00209565
Fracciones molares									
AGUA		0	0	0,689661	0,689661	0,723752	0,723752	0,369542	0,369542
ACIDO ACÉTICO		0	0	0,310339	0,310339	0,160981	0,160981	0,625916	0,625916
ACETATO DE ISOBUTILO		1	1	0	0	0,115267	0,115267	0,00454228	0,00454228
Flujos másicos	kg/hr	17	17	50	50	46	46	21	21
AGUA	kg/hr	0	0	20	20	17	17	31	31
ACIDO ACÉTICO	kg/hr	0	0	30	30	12	12	17	17
ACETATO DE ISOBUTILO	kg/hr	17	17	0	0	17	17	0,243431	0,243431

Fracción másicas									
AGUA		0	0	0,4	0,4	0,361226	0,361226	0,148693	0,148693
ACIDO ACÉTICO		0	0	0,6	0,6	0,267828	0,267828	0,839523	0,839523
ACETATO DE ISOBUTILO		1	1	0	0	0,370946	0,370946	0,0117846	0,0117846
Flujo volumétrico	l/min	0,333333	0,36515	0,833333	0,907394	1	0,810818	0,377275	0,337861

Nota: Se evidencia la tabla completa de los resultados de la simulación correspondiente al experimento de destilación azeotrópica. Se puede evidenciar el documento de Aspen Plus en:

<https://drive.google.com/drive/folders/1iYhsfjr0XjcrAfjoaTM0jy9bZFYZxUqB?usp=sharing>

ANEXO 4.

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN CORRESPONDIENTE A LA CONFIGURACIÓN DE ABSORCIÓN FÍSICA

Tabla 31.

Resultados de la simulación de absorción física.

Nombre de la Corriente	Unidades	Material						
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Desde								
Para			P-101		C-101	T-101	T-101	HE-101
Clase de corriente		P-101	T-101	C-101	T-101		HE-101	
Fase		Líquida	Líquida	Vapor	Vapor	Vapor	Líquida	Líquida
Temperatura	C	20	20	20	103	20	27	25
Presión	bar	1	2	1	2	2	2	2
Fracción molar de vapor		0	0	1	1	1	0	0
Fracción molar líquida		1	1	0	0	0	1	1
Fracción molar de solido		0	0	0	0	0	0	0
Fracción másica de vapor		0	0	1	1	1	0	0
Fracción másica de liquido		1	1	0	0	0	1	1
Fracción másica de solido		0	0	0	0	0	0	0
Entalpía molar	cal/mol	-68350,6	-68349,2	-11540	-10923,8	-712.082	-68179,2	-68213,2

Entalpía másica	cal/gm	-3794,04	-3793,96	-333.063	-315.279	-247.057	-3650,55	-3652,37
Entropía molar	cal/mol- K	-39	-39	1	2	-1	-38	-38
Entropía másica	cal/gm-K	-2	-2	0,0348864	0,0485423	-0,0507595	-205.255	-205.861
Densidad molar	mol/cc	0,05544	0,0554356	4,10E+00	6,39E+00	8,20E+00	0,0539586	0,0540613
Densidad másica	gm/cc	0,998767	0,998688	0,00142155	0,00221478	0,00236426	1	1
Flujo de entalpía	cal/sec	- 1,89E+11	- 1,89E+11	-27618,8	-26144,1	-1396,56	- 1,92E+11	- 1,92E+11
Promedio		18	18	35	35	29	19	19
Flujos molares	kmol/hr	100	100	9	9	7	101	101
DIÓXIDO DE AZUFRE	kmol/hr	0	0	14	14	5,76E-01	14	14
AGUA	kmol/hr	100	100	0	0	0,0828859	100	100
AIRE	kmol/hr	0	0	72	72	697.754	0,240467	0,240467
Fracciones molares								
DIÓXIDO DE AZUFRE		0	0	0,162249	0,162249	8,15E-02	0,0137933	0,0137933
AGUA		1	1	0	0	0,0117395	0,983834	0,983834
AIRE		0	0	0,837751	0,837751	0,98826	0,0023727	0,0023727
Flujos másicos	kg/hr	1797,78	1797,78	299	299	203,5	1892,81	1892,81
DIÓXIDO DE AZUFRE	kg/hr	0	0	90	90	0,000368726	9	9
AGUA	kg/hr	1797,78	1797,78	0	0	1	1796,29	1796,29

AIRE	kg/hr	0	0	209	209	202	7	7	
Fracción másicas									
DIÓXIDO DE AZUFRE		0	0	0,3	0,3	1,81E-01	0,0473145	0,0473145	
AGUA		1	1	0	0	0,00733767	0,949007	0,949007	
AIRE		0	0	0,7	0,7	0,992661	0,003678	0,003678	
Flujo Volumétrico	l/min		30	30,0024	3500	2246,47	1434,56	31,304	31,2446

Nota: Se evidencia la tabla completa de los resultados de la simulación correspondiente al experimento de absorción física. Se puede evidenciar el documento de Aspen Plus en:

<https://drive.google.com/drive/folders/1iYhsfjr0XjcrAfjoaTM0jy9bZFYZxUqB?usp=sharing>

ANEXO 5.

RESULTADOS DE LA SEGUNDA SIMULACIÓN CORRESPONDIENTE A LA CONFIGURACIÓN DE ABSORCIÓN FÍSICA

Tabla 32.

Resultados de la segunda simulación de absorción física

Nombre de la Corriente	Unidades	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Desde			P-101		C-101	T-101	T-101	HE-101
Para		P-101	T-101	C-101	T-101		HE-101	
Clase de corriente		CONVEN	CONVEN	CONVEN	CONVEN	CONVEN	CONVEN	CONVEN
Fase		Líquida	Líquida	Vapor	Vapor	Vapor	Líquida	Líquida
Temperatura	C	20	208.252	20	383.609	208.234	260.071	25
Presión	bar	1	11	1	11	1	1,5	1,5
Fracción molar de vapor		0	0	1	1	1	0	0
Fracción molar líquida		1	1	0	0	0	1	1
Fracción molar de solido		0	0	0	0	0	0	0
Fracción másica de vapor		0	0	1	1	1	0	0
Fracción másica de liquido		1	1	0	0	0	1	1
Fracción másica de solido		0	0	0	0	0	0	0
Entalpía molar	cal/mol	-68350,6	-68336,1	-1777,51	956.842	-1448,85	-67988,4	-68007
Entalpía másica	cal/gm	-3794,04	-3793,23	-65.695	353.638	-51	-3770,38	-3771,41
Entropía molar	cal/mol-K	-39	-39	-3	-2	-0,103665	-39	-39
Entropía másica	cal/gm-K	-2	-2	-0,110139	-0,0635047	-0,00361428	-2	-2

Densidad molar	mol/cc	0,05544	0,055396	4,10E+00	0,000201446	4,09E+00	0,0549396	0,0549938
Densidad másica	gm/cc	0,998767	0,997975	0,0011101	0,00545055	0,00117348	0,990684	0,991661
Flujo de entalpía	cal/sec	-3,16E+10	-3,16E+11	-1580,11	850,58	-984.893	-3,16E+11	-3,16E+11
Promedio		18	18	27	27	29	18	18
Flujos molares	kmol/hr	166,32	166,32	3	3	2	167	167
AGUA	kmol/hr	166,32	166,32	0	0	0,0601581	166,26	166,26
AMONIACO	kmol/hr	0	0	0,508428	0,508428	9,16E-10	0,508428	0,508428
AIRE	kmol/hr	0	0	27	27	24	0,304744	0,304744
Fracciones molares								
AGUA		1	1	0	0	0,0245825	0,995133	0,995133
AMONIACO		0	0	0,158874	0,158874	3,74E-10	0,00304315	0,00304315
AIRE		0	0	0,841126	0,841126	0,975417	0,00182402	0,00182402
Flujos másicos	kg/hr	2996,3	2996,3	87	87	70	3012,7	3012,7
AGUA	kg/hr	2996,3	2996,3	0	0	1	2995,22	2995,22
AMONIACO	kg/hr	0	0	9	9	1,56E-08	9	9
AIRE	kg/hr	0	0	78	78	69	9	9
Fracción másicas								
AGUA		1	1	0	0	0,0154404	0,994197	0,994197
AMONIACO		0	0	0,1	0,1	2,22E-10	0,0028741	0,0028741
AIRE		0	0	0,9	0,9	0,98456	0,00292848	0,00292848
Flujo Volumétrico	l/min	50	50	1300	264.769	996,9	51	51

Nota: Se evidencia la tabla completa de los resultados de la segunda simulación correspondiente al experimento de absorción física.

Se puede evidenciar el documento de Aspen Plus en:

<https://drive.google.com/drive/folders/1iYhsfjr0XjcrAfjoaTM0jy9bZFYZxUqB?usp=sharing>

ANEXO 6.

PLAN PARA LA PUESTA EN MARCHA DE LAS UNIDADES DE CEPURE

Figura 35.

Código QR del plan de puesta en marcha de las unidades de CEPURE.



Nota: Al escanear el código se tiene acceso al plan de puesta en marcha de las unidades de CEPURE del CEPIIS, igualmente se encuentra el documento en el siguiente enlace:

<https://drive.google.com/drive/folders/1t21lsnk66xh6RXG99STfXKqGg-YvzJaE?usp=sharing>

ANEXO 7.

PLAN PARA LA VALIDACIÓN DE LA UNIDAD DE DESTILACIÓN CONTINUA

Figura 36.

Código QR del plan de validación de la unidad de destilación continua de CEPURE.



Nota: Al escanear el código se tiene acceso al plan de validación de la unidad de destilación continua del CEPIIS, igualmente se encuentra el documento en el siguiente enlace:
<https://drive.google.com/drive/folders/1t21lsnk66xh6RXG99STfXKqGg-YvzJaE?usp=sharing>

ANEXO 8.

PLAN PARA LA VALIDACIÓN DE LA UNIDAD DE ABSORCIÓN DE GASES

Figura 37.

Código QR del plan de validación de la unidad de absorción de gases de CEPURE.



Nota: Al escanear el código se tiene acceso al plan de validación de la unidad de absorción de gases del CEPIIS, igualmente se encuentra el documento en el siguiente enlace:
<https://drive.google.com/drive/folders/1t21lsnk66xh6RXG99STfXKqGg-YvzJaE?usp=sharing>

ANEXO 9.

RECOMENDACIONES PARA ALARGAR LA VIDA ÚTIL DE LAS UNIDADES DE CEPURE

Figura 38.

Código QR de las recomendaciones para alargar la vida útil de las unidades de CEPURE.



Nota: Al escanear el código se tiene acceso a las recomendaciones para alargar la vida útil de las unidades de CEPURE, igualmente se encuentra el documento en el siguiente enlace:
<https://drive.google.com/drive/folders/1t21lsnk66xh6RXG99STfXKqGg-YvzJaE?usp=sharing>

ANEXO 10.

FORMATO DE REGISTRO PARA EL MANEJO DE LA UNIDAD DE DESTILACIÓN CONTINUA

Tabla 33.

Formato de registro para el manejo de los equipos presentes en la unidad de destilación continua.

	FORMATO DE REGISTRO PARA EL MANEJO DE LA UNIDAD DE DESTILACIÓN CONTINUA			Código:	
				Versión	1
	Fecha	DD/MM/AAAA			
	Página 1 de 1				
Realizado por:		Firma del responsable del chequeo:			
Cargo:					
Marque con una X el estado	C= Conforme	NC= No conforme		NA= No aplica	
Descripción	C	NC	NA	Observaciones	
El tanque de alimentación de solvente de la unidad de destilación se encuentra limpio y en buen estado					
El tanque de alimento de la unidad de absorción se encuentra limpio y en buen estado					
Las bombas dosificadoras están limpias y en buen estado					

Las válvulas de la unidad de destilación se encuentran limpias y en buen estado				
Las conexiones a servicios auxiliares de la unidad de destilación están en buen estado				
La estructura de destilación está en buen estado (escaleras, barandales, entre otros)				
No hay residuos de operaciones anteriores en los equipos de la unidad de destilación				
Las tuberías no presentan taponamientos y están limpias				
Los intercambiadores de calor no presentan taponamientos y están limpios				
El condensador no presenta corrosión ni abolladuras				
El tanque de reflujo de la unidad de destilación se encuentra limpio y en buen estado				
Las tuberías no presentan corrosión ni abolladuras				
La torre de destilación no presenta corrosión ni abolladuras				
La bomba de reflujo no presenta corrosión ni abolladuras				
Los enfriadores se encuentran limpios y en buen estado				

Los tanques colectores se encuentran limpios y en buen estado				
El rehervidor no presenta corrosión ni abolladuras				
No se encuentran reactivos sin etiqueta				
El personal cumple con los elementos de protección personal				
Se realiza una limpieza general a los equipos de destilación una vez terminen de operar				
Ningún equipo presenta vibraciones				
Las válvulas no presentan fugas o escapes				
Las tuberías no presentan fugas o escapes				
La torre de destilación no presenta caídas o aumentos de presión durante la operación				
Las bombas no presentan caídas o aumentos de presión durante la operación				
El visor de la columna se encuentra en buen estado				
No se aprecian vapores u olores correspondientes a sustancias químicas.				
Los sensores e indicadores del sistema de destilación se encuentran calibrados				

La zona de CEPURE cuenta con letreros con base en la seguridad industrial				
---	--	--	--	--

Nota: Se evidencia el formato de registro para controlar el manejo y el estado de los equipos presentes en la unidad de destilación continua y del entorno correspondiente a CEPURE. Es posible evidenciar el documento en formato PDF en la siguiente carpeta:

<https://drive.google.com/drive/folders/1W5C4oWFBWiKfZxLHmDJ3Ffpg2XZ1XVJd>

ANEXO 11.

FORMATO DE REGISTRO PARA EL MANEJO DE LA UNIDAD DE ABSORCIÓN DE GASES

Tabla 34.

Formato de registro para el manejo de los equipos presentes en la unidad de absorción de gases.

	FORMATO DE REGISTRO PARA EL MANEJO DE LA UNIDAD DE ABSORCIÓN DE GASES			Código:	
				Versión	1
				Fecha	DD/MM/AAAA
				Página 1 de 1	
Realizado por:		Firma del responsable del chequeo:			
Cargo:					
Marque con una X el estado	C= Conforme	NC= No conforme		NA= No aplica	
Descripción	C	NC	NA	Observaciones	
El tanque de almacenamiento de solvente fresco no presenta corrosión ni abolladuras.					
El tanque de almacenamiento de solvente gastado no presenta corrosión ni abolladuras.					
El compresor de la unidad de absorción se encuentra limpio y en buen estado.					
El filtro está limpio.					

Las conexiones a servicios auxiliares de la unidad de absorción están en buen estado.				
Las ruedas de la estructura de absorción están en buen estado.				
No hay residuos de operaciones anteriores en los equipos de la unidad de absorción.				
La trampa de vacío está limpia y en buen estado.				
La bomba de diafragma está limpia y en buen estado.				
Las tuberías no presentan taponamientos y están limpias.				
La bomba de vacío está limpia y en buen estado.				
Las válvulas de la unidad de absorción se encuentran limpias y en buen estado.				
Las tuberías no presentan corrosión ni abolladuras.				
La torre de absorción no presenta corrosión ni abolladuras.				
La torre de humidificación no presenta corrosión ni abolladuras.				
El ciclón no presenta corrosión ni abolladuras.				
El compresor no presenta corrosión ni abolladuras.				
La bomba de diafragma no presenta corrosión ni abolladuras.				

La bomba de vacío no presenta corrosión ni abolladuras.				
La trampa de vacío no presenta corrosión ni abolladuras.				
No se encuentran reactivos sin etiqueta.				
El personal cumple con los elementos de protección personal.				
Se realiza una limpieza general a los equipos de absorción una vez terminen de operar.				
Ningún equipo presenta vibraciones.				
Las válvulas no presentan fugas o escapes.				
Las tuberías no presentan fugas o escapes.				
La torre de absorción no presenta caídas o aumentos de presión durante la operación.				
La bomba no presenta caídas o aumentos de presión durante la operación.				
El compresor no presenta caídas o aumentos de presión durante la operación.				
Los sensores e indicadores del sistema de absorción se encuentran calibrados.				

El visor de la columna se encuentra en buen estado.				
La zona de CEPURE cuenta con letreros con base en la seguridad industrial.				
No se aprecian vapores u olores correspondientes a sustancias químicas.				

Nota: Se evidencia el formato de registro para controlar el manejo y el estado de los equipos presentes en la unidad de absorción de gases y del entorno correspondiente a CEPURE. Es posible evidenciar el documento en formato PDF en la siguiente carpeta: <https://drive.google.com/drive/folders/1W5C4oWFBWiKfZxLHmDJ3Ffpg2XZ1XVJd>

ANEXO 12.

PLAN OPERATIVO QUE CONSIDERA PARÁMETROS DE SEGURIDAD PARA EL PROCESO DE PUESTA EN MARCHA DE LOS EQUIPOS A ESCALA PILOTO DE CEPURE

Tabla 35.

Formato de plan operativo para la puesta en marcha de los equipos a escala piloto de CEPURE.

	PLAN OPERATIVO Y DE SEGURIDAD PARA LA PUESTA EN MARCHA DE LAS UNIDADES DE CEPURE		Código:	
			Versión	1
			Fecha	DD/MM/AAAA
			Página 1 de 1	
Realizado por:	Cargo:	Firma del responsable:		
Marque con una X el estado	R= Realizado	NC= No conforme		
Descripción	R	NC	Observaciones	
PRELIMINAR				
1. Verificar que los servicios auxiliares están disponibles (Agua de enfriamiento, sistemas de vapor y sistemas eléctricos).				
2. Todo el personal debe estar presente, como mínimo 15 personas por unidad con los elementos de seguridad y las capacitaciones correspondientes.				

3. Establecer el orden lógico que se debe seguir según lo indique el encargado de la puesta en marcha. Preferiblemente la puesta en marcha inicial, la prueba de garantías y las pruebas a realizar por equipo			
4. Realizar la organización y dirección de las acciones a realizar durante cada parte del proceso.			
5. Indicar la organización del tiempo de los recursos empleados.			
6. Asignar las funciones puntuales para todo el personal.			
7. Verificar que el personal cuente con el programa de entrenamiento asegurando una operación más segura.			
8. Realizar una orientación previa resaltando los aspectos de seguridad y suministrar los manuales de operación traducidos.			
9. Suministrar a los trabajadores el plan de seguridad en las unidades de destilación y absorción para no incurrir en incidentes.			
10. Dar a conocer los planes para el tratamiento de emergencias y qué hacer en caso de un accidente o paradas de emergencia.			
11. Realizar simulacros para identificar las acciones a tomar en momentos de emergencias.			
PUESTA EN MARCHA INICIAL ABSORCIÓN			
12. Operar la unidad de absorción con sustancias seguras y en pequeñas cantidades.			
13. Aumentar gradualmente la capacidad de operación de la unidad de absorción hasta alcanzar las condiciones de operación normal.			

14. Realizar pruebas en caliente en la unidad de absorción, es decir, bajo condiciones de presión y temperaturas similares a las de operación.			
15. Realizar pruebas con fluidos seguros en la unidad de absorción, tales como agua, aire o gases inertes.			
16. Realizar pruebas con disolventes en la unidad de absorción, es decir, fluidos con propiedades similares a los que se emplean en la operación normal.			
17. Realizar la puesta en marcha inicial de la unidad de absorción con el llenado de esta.			
18. Realizar la puesta en marcha inicial de la unidad de absorción con la circulación de esta.			
19. Realizar la puesta en marcha inicial de la unidad de absorción con el calentamiento de esta.			
20. Realizar la puesta en marcha inicial de la unidad de absorción con el llenado de esta.			
21. Realizar la puesta en marcha inicial de la unidad de absorción con la refrigeración de esta.			
22. Realizar la puesta en marcha inicial de la unidad de absorción con el análisis de operación de esta.			
PUESTA EN MARCHA INICIAL DESTILACIÓN			
12. Operar la unidad de destilación con sustancias seguras y en pequeñas cantidades.			
13. Aumentar gradualmente la capacidad de operación de la unidad de destilación hasta alcanzar las condiciones de operación normal			
14. Realizar pruebas en caliente en la unidad de destilación, es decir, bajo condiciones de presión y temperaturas similares a las de operación.			

15. Realizar pruebas con fluidos seguros en la unidad de destilación, tales como agua, aire o gases inertes.			
16. Realizar pruebas con disolventes en la unidad de destilación, es decir, fluidos con propiedades similares a los que se emplean en la operación normal.			
17. Realizar la puesta en marcha inicial de la unidad de destilación con el llenado de esta.			
18. Realizar la puesta en marcha inicial de la unidad de destilación con la circulación de esta.			
19. Realizar la puesta en marcha inicial de la unidad de destilación con el calentamiento de esta.			
20. Realizar la puesta en marcha inicial de la unidad de destilación con el llenado de esta.			
21. Realizar la puesta en marcha inicial de la unidad de destilación con la refrigeración de esta.			
22. Realizar la puesta en marcha inicial de la unidad de destilación con el análisis de operación de esta.			
ANÁLISIS			
23. Analizar si la unidad de absorción y/o destilación necesita modificaciones, sustituciones o reparaciones.			
24. En base al análisis anterior, perfeccionar el proceso y/o destilación y realizar de nuevo la puesta en marcha inicial de la unidad.			
PRUEBA DE GARANTÍAS ABSORCIÓN			
25. Iniciar la operación normal de la unidad de absorción con las condiciones normales de operación, las sustancias reales y según las especificaciones de diseño.			
26. Verificar los rendimientos de la unidad de absorción.			

27. Verificar el rendimiento del sistema de alimentación de la unidad de absorción.			
28. Verificar el rendimiento del sistema de generación de aire de la unidad de absorción.			
29. Verificar el rendimiento del sistema de humidificación de la unidad de absorción.			
30. Verificar el rendimiento del sistema de la columna de absorción de la unidad de absorción.			
31. Verificar el rendimiento del sistema de almacenamiento de solvente gastado de la unidad de absorción por medio de pruebas hidrostáticas			
32. Verificar el rendimiento del sistema de vacío de la unidad de absorción por medio de pruebas en agua.			
33. Verificar el correcto funcionamiento de los indicadores y controladores de la unidad de absorción por medio de baños en seco.			
34. Verificar el correcto funcionamiento del tablero de control de la unidad de absorción.			
35. El proveedor debe cubrir la prueba de garantías sobre garantía de capacidad, de rendimiento, de consumo de servicios auxiliares y de residuos.			
PRUEBA DE GARANTÍAS DESTILACIÓN			
25. Iniciar la operación normal de la unidad de destilación con las condiciones normales de operación, las sustancias reales y según las especificaciones de diseño.			
26. Verificar los rendimientos de la unidad de destilación.			
27. Verificar el rendimiento del sistema de alimentación de la unidad de destilación por medio de pruebas hidrostáticas y pruebas en agua			

28. Verificar el rendimiento de la columna de destilación y el rehervidor de la unidad de destilación.			
29. Verificar el rendimiento del sistema de condensación y reflujo la unidad de destilación.			
30. Verificar el correcto funcionamiento de los indicadores y controladores de la unidad de destilación por baños en seco.			
31. Verificar el correcto funcionamiento del tablero de control de la unidad de destilación.			
32. El proveedor debe cubrir la prueba de garantías sobre garantía de capacidad, de rendimiento, de consumo de servicios auxiliares y de residuos.			
PRUEBAS EN AGUA			
1. Desacoplar los tanques de almacenamiento y tanques colectores			
2. Comprobar el estado estructural de los tanques por inspección visual			
3. Verificar las tapas y su hermeticidad			
4. Verificar el estado de las soldaduras, detectar grietas, porosidad, entre otros.			
5. Inyectar aire a 15 psi y aplicar jabón a la superficie interna para identificar fugas.			
6. Llenar los tanques con agua a 50mm por encima de la capacidad.			
7. Verificar el estado de las soldaduras, conexiones a otros equipos, entre otros.			
PRUEBAS HIDROSTÁTICAS			

1. Verificar las conexiones entre los tanques y las bombas para verificación de tuberías y bombas.			
2. Inyectar aire a 15 psi y aplicar jabón a la sustancia de modo que corra por la tubería.			
3. Verificar el estado de las tuberías y conexiones a la bomba.			
BAÑOS EN SECO			
1. Emplear un elemento externo llamado baño seco.			
2. Realizar el acondicionamiento del equipo.			
3. Conectar el instrumento al equipo.			
4. Calentar el fluido que pasa por el sensor y tomar la medida en el baño seco.			
5. Anotar la medida del sensor a través del PLC.			
6. Realizar medidas comúnmente de 0 a 100°C.			
7. Realizar una comparativa de cada una de las medidas para cada uno de los aumentos de temperatura.			
8. Determinar la confiabilidad del sensor.			
9. Realizar las mediciones para cada una de las termocuplas principalmente las encontradas a lo largo de las columnas.			

Nota: Se evidencia el plan operativo realizado en formato tipo Check List para la ejecución del proceso de puesta en marcha de los equipos pertenecientes a las unidades de absorción de gases y destilación continua. Es posible evidenciar el documento en formato PDF en la siguiente carpeta: <https://drive.google.com/drive/folders/1W5C4oWFBWiKfZxLHmDJ3Ffpg2XZ1XVJd>

ANEXO 13.

PLAN OPERATIVO QUE CONSIDERA PARÁMETROS DE SEGURIDAD PARA EL PROCESO DE VALIDACIÓN DE LA UNIDAD DE DESTILACIÓN CONTINUA

Tabla 36.

Formato de plan operativo para la validación de la unidad de destilación continua.

	PLAN OPERATIVO Y DE SEGURIDAD PARA LA VALIDACIÓN DE LA UNIDAD DE DESTILACIÓN CONTINUA		Código:	
			Versión	1
			Fecha	DD/MM/AAAA
			Página 1 de 1	
Realizado por:		Cargo:	Firmado del responsable:	
Marque con una X el estado		R= Realizado		NC= No conforme
Descripción		R	NC	Observaciones
ADECUACIÓN DEL SISTEMA				
1. Ubicar las herramientas para operación, así como los elementos de seguridad y aseo.				
2. Purgar los tanques y válvulas donde pueda haber acumulado material de corridas anteriores.				
3. Asegurar que las válvulas de purga de los equipos se encuentran limpias, sin bloqueos que impidan su funcionamiento.				

4. Asegurar que las válvulas de purga de los equipos se encuentran cerradas para evitar descargas no controladas.			
VÁLVULAS DE PURGA			
<p>Tanque de alimentación de reactivo (V-24) (V-25) (V-26), tanque de alimentación de solvente(V-5)(V-6)(V-7), precalentador de alimento (V-34) (V-35), precalentador de solvente (V-14)(V-15), líneas de alimentación de reactivos a columna (V-93)(V-66), línea de alimentación al rehervidor (V-94), columna de destilación (V-97)(V-98), condensador (V-121) (V-122), visor de condensación (V-126) (V-127), tanque de reflujo (V-134)(V-136)(V-137), enfriador de cima (V-147)(V-150), tanques colectores de cima (V-154) (V-158), rehervidor (V-161) (V-166), enfriador de fondos (V-167), tanques colectores de fondos (V-173)(V-177).</p>			
5. Asegurarse que los indicadores de nivel se encuentran abiertos (LI-01) (LI-02) (LI-03) (LI-04) (LI-05) (LI-06) (LI-07) (LI-08).			
6. Purgar los tubos del precalentador de alimento abriendo las válvulas (V-38) (V-39).			
7. En caso de realizar una destilación extractiva, purgar los tubos del precalentador abriendo las válvulas (V-18) (V-19).			
8. Purgar los tubos del rehervidor abriendo las válvulas (V-164) (V-165).			
9. Cerrar las válvulas: (V-18), (V-19), (V-38), (V-39), (V-164), (V-165) una vez finalizada la purga.			
10. Energizar el tablero de control y confirmar que el sistema cuenta con energía.			
11. Antes de iniciar sesión confirmar que los equipos y líneas se encuentren limpios y se cuente con vapor de calentamiento y agua de enfriamiento para la operación.			

12. Acceder al menú de selección de operación de la unidad.			
13. Planear la práctica de laboratorio, el tiempo de preparación, tiempo disponible para realizar la práctica, número de estudiantes disponibles y tiempo de estabilización del equipo.			
CALIBRACIÓN DE ROTÁMETROS			
Rotámetro de alimento de reactivo			
14. Verificar que la válvula del bypass (V-29) se encuentre cerrada.			
15. Abrir la válvula de salida del rotámetro (V-30).			
16. Cerrar la válvula que alimenta el reactivo al rehervidor (V-32) y al precalentador de alimento (V-33).			
17. Abrir la válvula que permite la calibración del rotámetro (V-31).			
18. Abrir la válvula de entrada de reactivo al rotámetro (V-28) y cargar el tanque de alimentación (TK-102) con la solución de alimentación al reboiler.			
19. Abrir la válvula de succión de la bomba (V-23) y abrir totalmente la válvula de aguja del rotámetro.			
20. Encender la bomba de circulación de alimento (P-102) desde la pantalla, ingresando a la opción: Funciones independientes>calibración de rotámetros.			
21. Modificar el número de strokes de la bomba hasta alcanzar el flujo equivalente deseado y anotar el flujo indicado en el rotámetro.			
22. Medir el volumen de agua que pasa a través del rotámetro en un tiempo previamente determinado y realizar la medición por triplicado.			

23. Repetir los últimos 2 pasos para por lo menos 5 puntos adicionales cubriendo la escala completa del rotámetro y una vez finalizada la calibración, oprimir la opción Parar.			
Rotámetro de alimento de solvente			
24. Verificar que la válvula del bypass (V-10) se encuentre cerrada y abrir la válvula de salida del rotámetro (V-11).			
25. Cerrar la válvula que alimenta el reactivo al precalentador de solvente (V-13) y abrir la válvula que permite la calibración del rotámetro (V-12).			
26. Ubicar bajo la descarga del fluido un balde o probeta graduada y abrir la válvula de entrada de reactivo al rotámetro (V-9).			
27. Cargar el tanque de alimentación de solvente (TK-101) y abrir la válvula de succión de la bomba (V-4).			
28. Abrir totalmente la válvula de aguja del rotámetro y encender la bomba de circulación de solvente (P-101) desde la pantalla, ingresando a la opción: Funciones independientes>calibración de rotámetros.			
29. Modificar el número de strokes de la bomba hasta alcanzar el flujo equivalente deseado y anotar el flujo indicado en el rotámetro.			
30. Medir el volumen de agua que pasa a través del rotámetro en un tiempo previamente determinado y realizar la medición por triplicado.			
31. Repetir los últimos 2 pasos para por lo menos 5 puntos adicionales cubriendo la escala completa del rotámetro y una vez finalizada la calibración, oprimir la opción Parar.			
Rotámetros de reflujo			

32. Verificar que la válvula del bypass del rotámetro (V-139) o (V-143) se encuentre cerrada y abrir la válvula de salida del rotámetro a calibrar (V-140) o (V-144).			
33. Abrir la válvula que conecta el rotámetro que se va a calibrar a la línea de reflujo de la columna (V-141) o (V-145).			
34. Cerrar la válvula que alimenta el reflujo a la columna (V-99) y abrir la válvula (V-146).			
35. Ubicar bajo la descarga del fluido un balde o probeta graduada y abrir la válvula de entrada de reactivo al rotámetro que se va a calibrar (V-138) o (V-142).			
36. Cargar el tanque de reflujo (TK-103) con agua a través de la válvula (V-132) y al llenarse abrir la válvula de succión de la bomba (V-135).			
37. Abrir totalmente la válvula de aguja del rotámetro y encender la bomba de circulación de reflujo (P-103) desde la pantalla, ingresando a la opción: Funciones independientes>calibración de rotámetros.			
38. Modificar el número de strokes de la bomba hasta alcanzar el flujo equivalente deseado y anotar el flujo indicado en el rotámetro.			
39. Medir el volumen de agua que pasa a través del rotámetro en un tiempo previamente determinado y realizar la medición por triplicado.			
40. Repetir los últimos 2 pasos para por lo menos 5 puntos adicionales cubriendo la escala completa del rotámetro y una vez finalizada la calibración, oprimir la opción Parar.			
LLENADO DEL REHERVIDOR			
41. Abrir la línea que conecta el tanque TK-102 y encendiendo la bomba P-102 desde la pantalla de operación.			

CARGA DEL SISTEMA Y SELECCIÓN DE CONFIGURACIÓN DE TRABAJO			
42. Preparar la solución de alimentación, en caso de realizar destilación continua, preparar una solución con una composición cercana a la solución del efluente de fondos para alimentar el rehervidor.			
43. Cargar la solución de alimentación al tanque TK-102.			
44. Abrir la válvula (V-23) y la válvula de bypass del rotámetro (V-29) para alimentar el rehervidor.			
45. Cerrar la válvula que permite el paso al precalentador de alimento (V-33) y abrir las válvulas que alimentan al rehervidor (V-32) (V-95).			
46. Verificar que la línea que conecta el fondo de la torre al rehervidor se encuentra cerrada (V-97) y encender la bomba de alimentación de reactivo (P-102) e indicar los strokes de alimentación.			
47. Una vez se ha llenado el rehervidor apagar la bomba de alimentación (P-102).			
48. Si quedan residuos de la solución, purgar el tanque (TK-102) abriendo la válvula (V-24).			
49. Purgar la línea de alimentación al rehervidor abriendo las válvulas: (V-25) (V-26) (V-94).			
50. Cerrar las válvulas (V-25) (V-26) (V-94) tras purga para evitar derrames.			

51. Cerrar la válvula (V-95) y (V-32) para prevenir el retorno de vapores.			
52. En caso de que se necesite, cargar el solvente de extracción en el tanque TK-101.			
53. Permitir la entrada de agua al condensador abriendo las válvulas (V-123) y (V-124).			
54. Verificar que la válvula de salida (V-164) se encuentra abierta. Ubicar un balde a la salida del condensado para recolectar el condensado de vapor generado.			
55. Permitir el paso de vapor al rehervidor abriendo la válvula (V-163) fijando una presión entre 5 y 10 psi.			
56. Una vez se observe la formación de condensado en el visor, abrir la válvula que conecta el visor al enfriador de cimas (V-129) o (V-128).			
57. Abrir las válvulas de entrada y salida de agua de enfriamiento al enfriador de cima (V-148) y (V-149).			
58. Abrir la válvula que permite el paso a uno de los tanques colectores de cima (V-151) o (V-155).			
59. Tomar las muestras requeridas empleando las válvulas (V-126) o (V-127).			
PARADA DEL SISTEMA			
60. Al finalizar la práctica detener el ingreso de vapor al rehervidor cerrando la válvula (V-163).			

61. Permitir el flujo de agua de enfriamiento en el condensador hasta que no se observe formación de condensado en el visor.			
62. Una vez no exista flujo de destilado detener el paso de agua de enfriamiento al enfriador de cima y al condensador.			
63. Vaciar los tanques colectores de cima empleando las válvulas de purga (V-154) o (V-158).			
64. Purgar el enfriador de cima empleando la válvula (V-147) y (V-150) y purgar el condensador empleando las válvulas (V-121) y (V-122).			
65. Una vez la temperatura del rehervidor sea inferior a 50°C vaciar el equipo empleando las válvulas (V-161) (V-98) y (V-166).			

Nota: Se evidencia el plan operativo realizado en formato tipo Check List para la ejecución del proceso de validación de la unidad de destilación continua. Es posible evidenciar el documento en formato PDF en la siguiente carpeta:

<https://drive.google.com/drive/folders/1W5C4oWFBWiKfZxLHmDJ3Ffpg2XZ1XVJd>

ANEXO 14.

PLAN OPERATIVO QUE CONSIDERA PARÁMETROS DE SEGURIDAD PARA EL PROCESO DE VALIDACIÓN DE LA UNIDAD DE ABSORCIÓN DE GASES

Tabla 37.

Formato plan operativo para la validación de la unidad de absorción de gases.

	PLAN OPERATIVO Y DE SEGURIDAD PARA LA VALIDACIÓN DE LA UNIDAD DE ABSORCIÓN DE GASES		Código:	
			Versión	1
			Fecha	DD/MM/AAAA
			Página 1 de 1	
Realizado por:		Cargo:	Firma del responsable:	
Marque con una X el estado		R= Realizado		NC= No conforme
Descripción		R	NC	Observaciones
ADECUACIÓN DEL SISTEMA				
1. Ubicar las herramientas para operación, así como los elementos de seguridad y aseo.				
2. Purgar los tanques y válvulas donde pueda haber acumulado material de corridas anteriores.				
3. Asegurar que las válvulas de purga de los equipos se encuentran limpias, sin bloqueos que impidan su funcionamiento (V-03, V-33 y V-40).				

4. Asegurar que las válvulas de purga de los equipos se encuentran cerradas para evitar descargas no controladas.			
5. Verificar que las válvulas de alivio de los equipos se encuentran cerradas (V-01, V-24 y V-36).			
6. Asegurarse que los indicadores de nivel se encuentran abiertos. (LI-01, LI-02 y LI03).			
ARRANQUE DEL PROCESO			
Tanque de alimentación de solvente fresco.			
7. Cargar el tanque de alimentación de solvente a través de la válvula (V-02) hasta máximo el 80% de capacidad. Para la carga se rosca el embudo, abre la válvula (V-01) y se procede a la carga lenta para evitar derrames.			
8. Abrir totalmente las válvulas (V-04, V-05, V-09).			
9. Verificar que las válvulas que dan paso al solvente hacia la columna (V-10) y (V11), (V-06), y (V-42) están completamente cerradas.			
10. Encender la bomba de alimentación de solvente desde el tablero de control.			
Sistema de humidificación de aire.			
11. Cargar el humidificador al 80% de su capacidad máxima con el compuesto que será absorbido. Si se trata de agua de servicio, se dispone de una entrada lateral (V-26); si se emplea un compuesto diferente, se usa la entrada (V-24) a la que se rosca un embudo. Para la carga se cierra la válvula (V-28), se abre la válvula (V-25) y se procede a la carga lenta para evitar derrames.			
12. Verificar que la válvula que da paso al aire húmedo hacia la columna de absorción (V-34) está completamente cerrada.			

13. Verificar que la válvula (V-33) está completamente abierta, la válvula (V-15) y (V-46) están completamente cerradas.			
14. Abrir la válvula (V-20), (V-12), (V-13) y (V-20 y V-22).			
16. Encender el compresor.			
17. Abrir la válvula (V-27).			
18. Abrir la válvula (V-29).			
19. Mantener estas condiciones hasta que la medición registrada por el higrómetro en la corriente de aire húmedo permanezca constante.			
Columna de absorción.			
20. Abrir completamente la válvula (V-36).			
21. Verificar que la válvula (V-35) está completamente cerrada.			
22. Verificar que las válvulas (V-13 hasta V-18) se encuentran completamente cerradas.			
23. Abrir completamente las válvulas (V-10) y (V-11).			
24. Cerrar completamente la válvula (V-09).			
25. Abrir completamente la válvula (V-12) y abrir lentamente la válvula (V-34).			
26. Cerrar completamente la válvula (V-33).			
27. Permitir que el sistema se estabilice dejando trascorrir al menos 30 minutos.			
28. Realizar la toma de muestras de la columna y el registro de caudal de aire y de solvente, y de la presión en la columna; en intervalos entre 2 min- 5 min.			

29. Para el muestreo de la columna, se abre lentamente las válvulas (V-25 a V-30), se toma la cantidad de muestra necesaria de acuerdo con el análisis y se cierra la válvula.			
PARADA DEL PROCESO			
30. Apagar el compresor.			
31. Dejar transcurrir unos minutos y luego apagar la bomba de alimentación de solvente desde el tablero de control.			
32. Mantener abierta la válvula (V-36) hasta que se desocupe la columna.			
33. Cerrar la válvula (V-27).			
34. Cerrar la válvula (V-29) cuando no se observe más salida de condensados de la chaqueta del humidificador de aire.			
RECUPERACIÓN DE SOLVENTE			
35. Cerrar completamente la válvula (V-36).			
36. Cerrar completamente la válvula (V-38).			
37. Verificar que la válvula (V-42) y (V-41) están completamente cerradas.			
38. Verificar que la válvula (V-48) y (V-43) de la bomba de retorno de solvente están completamente cerradas.			
39. Verificar que la válvula (V-40) de la chaqueta del tanque de solvente gastado está completamente abierta.			
40. Llenar de hielo la trampa de vacío.			
41. Abrir la válvula que conecta el tanque de solvente gastado con la trampa de vacío (V-39).			
42. Abrir la válvula (V-37).			
43. Abrir la válvula que conecta la trampa con la bomba de vacío (V-44).			
44. Encender la bomba de vacío.			

45. Mantener la operación en estas condiciones hasta alcanzar la pureza de solvente deseada.			
46. Apagar la bomba de vacío.			
47. Cerrar la válvula (V-37).			
48. Verificar que la válvula (V-03) y (V-04) se encuentran cerradas.			
49. Abrir lentamente la válvula (V-38).			
50. Abrir la válvula (V-01).			
51. Abrir completamente la válvula (V-48) y la (V-43).			
52. Encender la bomba de retorno de solvente.			
53. Permitir que el tanque de solvente fresco se llene máximo hasta el 80% de su capacidad.			

Nota: Se evidencia el plan operativo realizado en formato tipo Check List para la ejecución del proceso de validación de la unidad de absorción de gases. Es posible evidenciar el documento en formato PDF en la siguiente carpeta:

<https://drive.google.com/drive/folders/1W5C4oWFBWiKfZxLHmDJ3Ffpg2XZ1XVJd>

ANEXO 15

RECOMENDACIONES

Realizar la puesta en marcha de cada uno de los equipos y componentes de las unidades de destilación continua y absorción de gases en sitio de forma que se realice la verificación del funcionamiento óptimo de las unidades.

Establecer un análisis más profundo con respecto a las sustancias químicas compatibles con los materiales de fabricación de las unidades de proceso de modo que se pueda realizar una ampliación de los experimentos posibles a realizar en cada una de las configuraciones de trabajo de las columnas de destilación y absorción.

Implementar en las simulaciones de proceso del programa Aspen Plus las especificaciones de diseño de las columnas, de los intercambiadores y demás equipos de forma que los resultados de operación y de costos se acerquen aún más al comportamiento que tendrán las unidades de proceso en sitio.

Realizar capacitaciones a los funcionarios y a los estudiantes de la Universidad de América con respecto a los factores de seguridad para tener en cuenta al momento de operar las unidades de proceso, además de una capacitación con respecto al mantenimiento de todos los componentes de las columnas.

Se recomienda realizar el proceso de validación de las unidades de proceso de forma que se establezcan y se verifiquen los límites de operación de cada uno de los equipos para realizar simulaciones de acuerdo con dichos valores y predecir el comportamiento de las unidades, además de prever cualquier incidente o accidente que se pueda generar al sobrepasar dichos límites.

Variar las composiciones y la naturaleza de los compuestos implementados en el proceso de validación de las unidades, con el fin de analizar los resultados obtenidos variando las composiciones de las corrientes y asimismo poder establecer mejores rutas de separación identificando las variables que influyen en el aumento del factor de separación.

En el caso específico del Centro de Procesos de la Universidad de América se recomienda realizar una optimización de este, integrando las unidades de proceso, es decir, realizar conexiones entre el banco de reactores, la unidad de destilación, la unidad de absorción y optimizar el gasto energético mediante las mismas.

