

**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**

**MARIANA ESPITIA VELANDIA MATEO  
STEVEN VARGAS JIMENEZ**

**Proyecto de grado para optar al título de  
INGENIERO QUÍMICO**

**DIRECTOR**

**Iván Ramírez Marín**

**INGENIERO QUIMICO**

**CODIRECTOR**

**Javier Alexander Acosta Cubillos**

**QUÍMICO**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C.**

**2022**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**Nombre**  
**Firma de director**

---

**Nombre**  
**Firma del presidente Jurado**

---

**Nombre**  
**Firma del Jurado**

---

**Nombre**  
**Firma del Jurado**

**Bogotá, D.C. Julio de 2022**

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Vicerrector Académico y de Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano Facultad de Ingenierías

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Director del Programa de Ingeniería Química

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

## **DEDICATORIA**

Dedicamos este trabajo a Dios por darnos las fuerzas para seguir en este arduo camino, a nuestros padres que sin el apoyo de ellos llegar hasta este punto de la carrera no hubiese sido posible, a nuestros hermanos y abuelos por estar ahí cuando más los necesitamos.

A todos los profesores por su tiempo apoyo, vocación y entrega depositada durante cada una de las clases; a nuestros amigos y compañeros por el apoyo que nos dieron cada día.

A nosotros por nuestra paciencia, perseverancia, entrega y sacrificio para llegar a la última etapa de la carrera, y en general a las personas que contribuyeron en nuestra formación, haciendo de nosotros mejores personas.

También, agradecemos a los profesores Iván Marín, Juan Camilo Cely y Luis Figueroa por el tiempo, orientación y apoyo brindado en el desarrollo de este trabajo. De igual manera agradecemos el apoyo de nuestro codirector Javier Acosta Cubillos por compartirnos su amplia experiencia en el área de gestión del riesgo en procesos.

Finalmente, agradecemos a la Universidad de América nuestro segundo hogar, por exigirnos y prepararnos como Ingenieros químicos y sobre todo formarnos como personas.

*Con admiración y cariño*

**Mariana y Mateo**

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

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVOS	16
1. GENERALIDADES TEÓRICAS	17
1.1 Plantas piloto	17
1.1.1 <i>Seguridad en la Plantas piloto</i>	18
1.2 Seguridad de procesos	19
1.3 Gestión de riesgos	22
1.3.1 <i>Riesgos operacionales</i>	25
1.3.2 <i>Matriz de riesgo operativo</i>	26
1.4 Herramientas y métodos de análisis de riesgos	33
1.4.1 <i>What If</i>	34
1.4.2 <i>HAZOP</i>	37
1.4.3 <i>Metodología Bow-Tie</i>	46
2. ZONAS DE RIESGO EN LA PLANTA PILOTO	52
2.1 Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE)	53
2.1.1 <i>Columna de destilación</i>	54
2.1.2 <i>Columna de absorción</i>	64
2.1.3 <i>Secador de bandejas SB-500</i>	74
2.1.4 <i>Extractor sólido-líquido y liquido-liquido</i>	79
2.2 Centro de transformación y adecuación (CETA)	89
2.2.1 <i>Banco de reactores</i>	91
2.2.2 <i>Tren de evaporadores</i>	100
3 ANÁLISIS FUNCIONAL DE OPERATIVIDAD (HAZOP) DE LAS ZONAS ANÁLIZADAS EN EL CEPIIS	108
3.1 Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE)	109
3.1.1 <i>Columna de destilación</i>	109
3.1.2 <i>Columna de absorción</i>	127
3.1.3 <i>Secador de bandejas SB-500</i>	142

3.1.4	<i>Extractor líquido- líquido y sólido-líquido</i>	145
3.2	Centro de transformación y adecuación (CETA)	160
3.2.1	<i>Banco de reactores</i>	160
3.2.2	<i>Tren de evaporadores</i>	187
4	METODOLOGÍA BOWTIE	222
4.1	Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE)	223
4.1.1	<i>Columna de destilación</i>	223
4.1.2	<i>Columna de absorción</i>	228
4.1.3	<i>Secador de bandejas SB-500</i>	232
4.1.4	<i>Extractor sólido-líquido y líquido-líquido</i>	234
4.2	Centro de transformación y adecuación (CETA)	239
4.2.1	<i>Banco de reactores</i>	239
4.2.2	<i>Tren de evaporadores</i>	245
4.3	Análisis de la metodología Bow-Tie	250
5	CONCLUSIONES	252
6	RECOMENDACIONES	254
	BIBLIOGRAFÍA	255

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Caminos hacia la producción industrial	17
<b>Figura 2.</b> Evolución de las estrategias de seguridad de procesos y prevención de accidentes/pérdidas.	20
<b>Figura 3.</b> Principios fundamentales de la gestión del riesgo	23
<b>Figura 4.</b> Proceso de gestión de riesgos	24
<b>Figura 5.</b> Clasificación del riesgo	30
<b>Figura 6.</b> Matriz de riesgos operacionales	31
<b>Figura 7.</b> Significado de la valoración del riesgo	32
<b>Figura 8.</b> Formato para la aplicación de la herramienta What If	37
<b>Figura 9.</b> Diagrama de flujo – síntesis de las etapas a seguir en un estudio HAZOP	39
<b>Figura 10.</b> Parámetros específicos y generales para analizar en un estudio HAZOP	41
<b>Figura 11.</b> Palabras guía empleadas en un HAZOP	42
<b>Figura 12.</b> Palabras guía aplicadas a los parámetros a analizar	43
<b>Figura 13.</b> Relación entre la causa, escenario y consecuencias	44
<b>Figura 14.</b> Estructura empleada en un HAZOP de procesos	46
<b>Figura 15.</b> Elementos básicos de un diagrama Bow-Tie	47
<b>Figura 16.</b> Ejemplo de un evento límite y peligro	48
<b>Figura 17.</b> Ejemplo de una consecuencia	49
<b>Figura 18.</b> Ejemplo de amenaza	50
<b>Figura 19.</b> Ejemplo de factores y controles de degradación	51
<b>Figura 20.</b> Render del Centro de procesos e innovación para la industria sostenible (CEPIIS)	52
<b>Figura 21.</b> Render del Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE)	53
<b>Figura 22.</b> Ilustración de una columna de destilación	55
<b>Figura 23.</b> Columna de destilación del Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE)	57
<b>Figura 24.</b> Diagrama de la columna de destilación del Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE)	58
<b>Figura 25.</b> Operación de la columna de destilación convencional	60
<b>Figura 26.</b> Operación de la columna de destilación extractiva	61
<b>Figura 27.</b> Operación de la columna de destilación azeotrópica	62
<b>Figura 28.</b> Operación básica de una columna de absorción y desorción	65

<b>Figura 29.</b> Columna de absorción del Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE)	68
<b>Figura 30.</b> Diagrama columna de absorción del Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE)	69
<b>Figura 31.</b> Ilustración de un secador de bandejas	75
<b>Figura 32.</b> Secador de bandejas del Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE)	76
<b>Figura 33.</b> Diagrama secador de bandejas del Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE)	77
<b>Figura 34.</b> Extracción sólido-líquido en el proceso de obtención de aceite crudo de palma	80
<b>Figura 35.</b> Extracción líquido-líquido	81
<b>Figura 36.</b> Extracción líquido-líquido y sólido-líquido del Centro de purificación y refinación de producto	84
<b>Figura 37.</b> Diagrama equipo de Extracción líquido-líquido y sólido-líquido del Centro de purificación y refinación de producto	85
<b>Figura 38.</b> Render del Centro de transformación y adecuación (CETA)	90
<b>Figura 39.</b> Reactor por lotes	91
<b>Figura 40.</b> Reactor CSTR	92
<b>Figura 41.</b> Reactor PFR	93
<b>Figura 42.</b> Reactor PBR	93
<b>Figura 43.</b> Banco de reactores del Centro de transformación y adecuación (CETA)	95
<b>Figura 44.</b> Diagrama de banco de reactores del Centro de transformación y adecuación (CETA)	96
<b>Figura 45.</b> Evaporadores de cuádruple efecto con alimentación en corriente directa o paralela	101
<b>Figura 46.</b> Evaporadores de cuádruple efecto con alimentación en contracorriente	101
<b>Figura 47.</b> Tren de evaporadores del Centro de transformación y adecuación (CETA)	104
<b>Figura 48.</b> Diagrama Tren de evaporadores del Centro de transformación y adecuación (CETA)	105
<b>Figura 49.</b> Columna de destilación – Pérdida de contención en los taques TK-101 y TK-102	223
<b>Figura 50.</b> Columna de destilación – Disminución en la presión del intercambiador HE-101/102	224
<b>Figura 51.</b> Columna de destilación – Inundación en la columna	225
<b>Figura 52.</b> Columna de destilación – Goteo en la columna	226
<b>Figura 53.</b> Columna de destilación – Ruptura de tuberías	227
<b>Figura 54.</b> Columna de absorción – Aumento de nivel en el tanque de solvente fresco	228

<b>Figura 55.</b> Columna de absorción – Inundación en la columna	229
<b>Figura 56.</b> Columna de absorción – Ruptura de sellos, tubería o collar de soldadura	230
<b>Figura 57.</b> Columna de absorción – Aumento de nivel en el tanque de solvente gastado	231
<b>Figura 58.</b> Secador de bandejas- Aumento de temperatura y afectación al material	232
<b>Figura 59.</b> Secador de bandejas - Variación de flujo de aire	233
<b>Figura 60.</b> Extractor líquido-líquido y sólido-líquido – Tanque de aceite térmico	234
<b>Figura 61.</b> Extractor líquido-líquido y sólido-líquido – Pérdida de contención del percolador	235
<b>Figura 62.</b> Extractor líquido-líquido y sólido-líquido – Tamaño de partícula en el percolador	236
<b>Figura 63.</b> Extractor líquido-líquido y sólido-líquido – Pérdida de contención del concentrador	237
<b>Figura 64.</b> Extractor líquido-líquido y sólido-líquido – Pérdida de contención en los tanques recolectores	238
<b>Figura 65.</b> Banco de reactores – Pérdida de contención en reactores CSTR	239
<b>Figura 66.</b> Banco de reactores – Pérdida de contención en reactores PFR	240
<b>Figura 67.</b> Banco de reactores – Pérdida de contención en reactor PBR	241
<b>Figura 68.</b> Banco de reactores – Tanques de alimentación TK-101 y TK-102	242
<b>Figura 69.</b> Banco de reactores – Tanques de recolección de producto TK-103 y TK-104	243
<b>Figura 70.</b> Banco de reactores – Tanques de aceite térmico TK-105 y TK-106	244
<b>Figura 71.</b> Tren de evaporadores – Tanque de alimentación TK-101	245
<b>Figura 72.</b> Tren de evaporadores – Evaporador de tubos verticales E-101	246
<b>Figura 73.</b> Tren de evaporadores – Evaporador de tubos horizontales E-102	247
<b>Figura 74.</b> Tren de evaporadores – Evaporador de chaqueta E-103	248
<b>Figura 75.</b> Tren de evaporadores – Evaporador de circulación forzada	249
<b>Figura 76.</b> Código QR del What If realizado para el centro de proceso de la Universidad de América	260
<b>Figura 77.</b> Código QR del Formato HAZOP realizado para el CEPIIS	261
<b>Figura 78.</b> Plan de Gestión de Riesgo CEPIIS	273

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Principios de prevención de accidentes de seguridad de procesos y RBPS asociados a elementos.	21
<b>Tabla 2.</b> Factores de riesgos operacionales	25
<b>Tabla 3.</b> Parámetros de probabilidad	27
<b>Tabla 4.</b> Impacto en las personas	28
<b>Tabla 5.</b> Consecuencias en la categoría de medio ambiente	29
<b>Tabla 6.</b> Posibles configuraciones de operación en el tren de evaporadores	106
<b>Tabla 7.</b> HAZOP Columna de destilación – Nodo TK-101 y TK-102	109
<b>Tabla 8.</b> HAZOP Columna de destilación – Nodo HE-101 / HE-102	112
<b>Tabla 9.</b> HAZOP Columna de destilación – Nodo C-101 Alimentación	116
<b>Tabla 10.</b> HAZOP Columna de destilación – Nodo C-101 Cima	120
<b>Tabla 11.</b> HAZOP Columna de destilación –Nodo C-101 Fondos	123
<b>Tabla 12.</b> HAZOP Columna de absorción – Nodo TK-101	127
<b>Tabla 13.</b> HAZOP Columna de absorción – Nodo Compresor y humidificador	131
<b>Tabla 14.</b> HAZOP Columna de absorción – Nodo Tanque de solvente gastado	134
<b>Tabla 15.</b> HAZOP Columna de absorción – Nodo TK-103	139
<b>Tabla 16.</b> HAZOP Nodo Secador de bandejas	142
<b>Tabla 17.</b> HAZOP Planta De Extracción Sólido-Líquido y Líquido-Líquido – Nodo TK-101	145
<b>Tabla 18.</b> HAZOP Planta De Extracción Sólido-Líquido y Líquido-Líquido – Nodo Percolador	149
<b>Tabla 19.</b> HAZOP Planta De Extracción Sólido-Líquido y Líquido-Líquido – Nodo Concentrador	153
<b>Tabla 20.</b> HAZOP Planta De Extracción Sólido-Líquido y Líquido-Líquido – Nodo TK-102 y TK-103	157
<b>Tabla 21.</b> HAZOP Banco de reactores – Nodo CSTR	160
<b>Tabla 22.</b> HAZOP Banco de reactores – Nodo PFR	166
<b>Tabla 23.</b> HAZOP Banco de reactores – Nodo PBR	171
<b>Tabla 24.</b> HAZOP Banco de reactores – Nodo TK-101 y TK-102	176
<b>Tabla 25.</b> HAZOP Banco de reactores – Nodo TK-103 y TK-104	180
<b>Tabla 26.</b> HAZOP Banco de reactores – Nodo TK-105 y TK-106	183
<b>Tabla 27.</b> HAZOP Tren de evaporadores – Nodo E-101	187

<b>Tabla 28.</b> HAZOP Tren de evaporadores – Nodo E-102	192
<b>Tabla 29.</b> HAZOP Tren de evaporadores – Nodo E-103	198
<b>Tabla 30.</b> HAZOP Tren de evaporadores – Nodo E-104	204
<b>Tabla 31.</b> HAZOP Tren de evaporadores – Nodo TK-101	210
<b>Tabla 32.</b> Tabla de compatibilidad de sustancias para los equipos propuestos por PSE	262
<b>Tabla 33.</b> Requerimientos de salvaguardas en los equipos del CEPURE y CETA	268

## RESUMEN

Este proyecto se realizó con el fin de proponer un plan de gestión de riesgo en el Centro de procesos e innovación para la industria sostenible (CEPIIS) de la Universidad de América aplicando herramientas de análisis de riesgo tales como What If, HAZOP y la metodología Bow-Tie. Lo cual incluye identificar los riesgos y peligros presentes en las diferentes zonas de la planta piloto, considerando el diseño, operación y la normativa referente, permitiendo realizar un análisis detallado de las variables y factores relacionados en el desarrollo operativo y funcional de la planta.

Debido a esto se construyeron las causas y consecuencias derivadas de los riesgos identificados, y se elaboraron las medidas de prevención y mitigación para disminuir las afectaciones al personal, equipos, infraestructura y ecosistemas aledaños a la ubicación de la planta piloto.

En primer lugar, se llevó a cabo un What If para hacer una evaluación de riesgo preliminar de la planta piloto, realizando una lluvia de ideas con todos los integrantes del CEPIIS para determinar el “¿Qué pasaría si...?”, las consecuencias y recomendaciones.

En segunda instancia se identificaron las zonas de riesgo que son el Centro de purificación y refinación de producto CEPURE y el Centro de transformación y adecuación CETA. Para ello se analizaron cada uno de los equipos que conforman la zona utilizando los manuales de operación y P&ID's disponibles. Posteriormente se inició el análisis HAZOP y se determinaron los nodos correspondientes a cada equipo, las desviaciones, causas, consecuencias, salvaguardas y recomendaciones de cada escenario. Al finalizar el análisis, se realizó la valoración del riesgo utilizando la matriz de riesgo operacional propuesta en el documento para determinar si el riesgo es bajo, medio, alto o crítico.

Finalmente se seleccionaron los escenarios que representaban un riesgo mayor en cada equipo para aplicar la metodología Bow-Tie, que consiste en representar de forma gráfica y dinámica las amenazas, barreras de prevención y mitigación, el peligro, evento límite y consecuencias, permitiendo que el personal pueda visualizarlo y entenderlo de una manera más sencilla.

Al final del documento se encuentran los análisis obtenidos en cada una de las metodologías aplicadas, las conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos relacionados a la gestión del riesgo en la planta piloto.

**Palabras clave:** Seguridad procesos, gestión riesgos, causas, consecuencias, medidas de mitigación, What If, HAZOP, Bow-Tie.

## INTRODUCCIÓN

En el diseño, construcción, puesta en marcha y operación de toda planta es importante implementar la seguridad de procesos debido a la posibilidad de que ocurran accidentes que afecten la integridad del personal, los equipos y el desarrollo del ecosistema. Por esta razón, tras la catástrofe ocurrida en Bhopal – India (1984), las industrias solicitaron al American Institute of Chemical Engineers (AIChE) liderar un esfuerzo colaborativo para eliminar los incidentes en procesos, mediante la aplicación de prácticas de gestión de riesgos. Es así que, un año después el AIChE formó el Center for Chemical Process Safety (CCPS), caracterizado por aportar numerosas publicaciones guía para implementar programas de seguridad de procesos en la industria y currículos de universidades [1].

El campo de la ingeniería química se ve fuertemente relacionado con la seguridad de plantas, en áreas como el control de procesos y la detección de desviaciones o irregularidades asociadas al proceso, siendo fundamentales a la hora de rectificar si las variables de proceso se encuentran dentro de los límites operacionales y seguros. De manera que, se analizan los posibles fallos de operación de la planta en cada una de sus etapas, con el fin de proponer medidas correctivas que permitan restablecer las condiciones normales de operación.

El centro de procesos e innovación para la industria sostenible (CEPIIS) de la Universidad de América tiene por objeto supervisar el diseño, construcción y puesta en marcha de la planta piloto ubicada en la sede Eco-campus de la universidad que será útil para estudiantes, maestros y empresas interesadas; por tal razón la seguridad de procesos es uno de los factores importantes a implementar, específicamente la gestión de riesgos.

El presente proyecto busca determinar los posibles riesgos, desviaciones, medidas de prevención y mitigación asociados al desarrollo operacional de la planta piloto en la universidad aplicando diversas herramientas como el What If, HAZOP y la metodología Bow-Tie. De esta manera, una adecuada implementación de la gestión de riesgos permitirá minimizar y prevenir posibles afectaciones del proceso, daños en los equipos, afectaciones a la integridad del personal y el buen desarrollo de los ecosistemas presentes, desde un punto de vista ingenieril enfocado al diseño y control de procesos, que convergen como herramientas para el desarrollo integral del proyecto propuesto.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Proponer un plan de gestión de riesgo para 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.

### **Objetivos específicos**

- Identificar las zonas de riesgo de la planta piloto considerando el diseño, operación, normativa y peligros relacionados.
- Analizar las variables, factores de riesgo y peligros evidenciados en las zonas de riesgo implementando las herramientas What If y HAZOP.
- Construir las causas y consecuencias asociadas a los riesgos utilizando la herramienta de análisis de riesgo HAZOP.
- Elaborar un plan de gestión de las medidas de prevención y mitigación de los riesgos delimitados por zonas aplicando el HAZOP y la metodología Bow-Tie.

# 1. GENERALIDADES TEÓRICAS

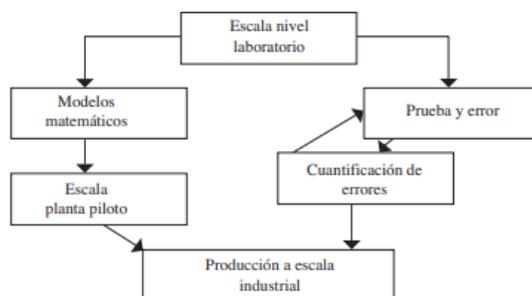
## 1.1 Plantas piloto

Se define como Planta Piloto al proceso que consiste en partes específicas ensambladas que operan como un todo armónico con el propósito de reproducir, a escala, procesos productivos [2]. En estos procesos intervienen fenómenos, simples o complejos, de interés para la ingeniería química, permitiendo el análisis en operaciones relacionadas con la termodinámica, mecánica de fluidos, transferencia de masa y energía, cinética, la biotecnología, el control de procesos, entre otras.

El uso de plantas piloto permite correlacionar la teoría y lo experimental, para obtener resultados de procesos industriales más acordes a la realidad, de esta manera se busca implementar, modificar o diseñar un proceso a pequeña escala que sirva de base al momento de trasladarlo a la industria, siendo parte de los caminos que llevan a la producción a nivel industrial (figura 1).

**Figura 1.**

*Caminos hacia la producción industrial*



**Nota.** La figura representa los caminos hacia la producción industrial. Tomado de [A. Anaya-Durand and H. Pedroza-Flores, “Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina,” 2008]

Por lo tanto, en general una planta a escala piloto tiene por objeto:

- Comprobar en equipos similares a los usados comercialmente, el comportamiento de los mecanismos de reacción y separación, como también los rendimientos que se pueden esperar, lo cual es necesario definir con cierta precisión para poder evaluar los impactos económicos que tienen en la planta comercial.

- Obtener la suficiente información del proceso, para evaluar el impacto económico en el proyecto, como por ejemplo costos de operación, capital de inversión, servicios, depreciación, entre otros.
- Establecer el camino más adecuado y eficiente para el desarrollo del proceso, al realizar un monitoreo detallado de las variables involucradas en el proceso con el fin de modificarlas permitiendo minimizar costos, reducir desviaciones que generen riesgo y acortar tiempos de producción.

### ***1.1.1 Seguridad en la Plantas piloto***

La seguridad representa un papel importante en el desarrollo y gestión de las plantas piloto, puesto que los riesgos de accidentes y pérdidas materiales exigen adoptar medidas de seguridad que se apliquen durante el funcionamiento de la planta. Algunos eventos que se pueden presentar en las plantas piloto que generen riesgos son:

- Ensayos insuficientes o inadecuados en el laboratorio [3]. Esto debido a una falla en la investigación de las propiedades de los reactivos, productos intermedios o finales, afectación por parte de la impurezas o surgimiento de reacciones colaterales.
- Fallos u observaciones en el laboratorio no informadas que sean significativas en un proceso a mayor escala.
- Falta de discusión entre el grupo multidisciplinario sobre las características del proceso.
- No se presenta información suficiente sobre la toxicidad, características explosivas o inflamables de reactivos, productos intermedios o finales y residuos.

Si se desea introducir un nuevo proceso a la planta piloto, se debe realizar una preparación apropiada. Para ello es necesario seguir los siguientes pasos [3].

1. Realizar una transmisión adecuada de la información inherente al proceso.
2. El grupo multidisciplinario que participará en el desarrollo de la escala piloto debe efectuar una discusión técnica de la información recibida.
3. Reproducción de la síntesis a escala pequeña (banco o laboratorio), para poder definir el modo de operación en la planta y precisar problemas inherentes al proceso.
4. Realizar un estudio de proceso en la planta piloto.
5. Elaborar un informe técnico o de desarrollo tecnológico del proceso.

La gestión de una planta piloto requiere de una correcta planificación, en donde la evaluación del trabajo en la planta comienza con la formulación de diagramas de flujos o la valoración de la posibilidad de empleo de una instalación existente apropiada para los fines propuestos [3].

Este trabajo debe estar dirigido al chequeo de la operatividad de la planta, en donde se debe considerar el nivel de instrumentación, la disponibilidad de equipos, la puesta en marcha y parada fácil de equipos, la disponibilidad para realizar instalaciones o conexiones eventuales y contar con personal apto para los oficios presentes en la planta. Estas prácticas permiten garantizar los procesos llevados a cabo en la planta piloto, mejorando su operatividad y adecuación sistemática a los objetivos propuestos [3].

## **1.2 Seguridad de procesos**

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

La implementación de la seguridad de procesos permite a una organización reducir la frecuencia y gravedad de los incidentes, mejorando su desempeño comercial, ambiental y de seguridad a largo plazo [4]. Según el CCPS (Center for Chemical Process Safety) todas las industrias que fabrican, consumen o manipulan productos químicos peligrosos o energía deben realizar diferentes consideraciones como:

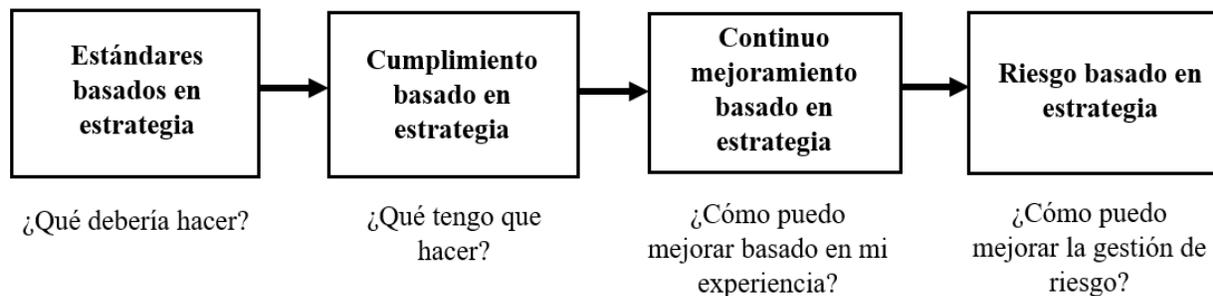
- Desarrollar su enfoque de prevención de accidentes partiendo desde el cumplimiento de una estrategia basada en riesgos.
- Mejorar continuamente la eficacia del sistema de gestión implementado.
- Mediante los principios de diseño basados en riesgo emplear la gestión de la seguridad de los procesos.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

Las principales causas de los incidentes de procesos químicos se pueden agrupar en una o más de las siguientes categorías: fallos tecnológicos, fallos humanos, fallos del sistema de gestión,

circunstancias externas y fenómenos naturales [4]. Debido a esto, las industrias han evolucionado varios enfoques para prevenir accidentes y pérdidas de productos químicos como se evidencia en la figura 2.

**Figura 2.**

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



**Nota:** La figura representa la evaluación de estrategias de seguridad de procesos y prevención de accidentes. Tomado de [Center for Chemical Process Safety, GUIDELINES FOR RISK BASED PROCESS SAFETY. United States of America, 2007].

Para implementar la seguridad de procesos, el CCPS integra lecciones de la industria aprendidas durante la historia, aplica el sistema “planificar, hacer, verificar, actuar” y los ordena de tal forma que sean útiles para todas las organizaciones [4]. Por lo tanto, plantean un sistema de gestión RBPS (Risk Based Process Safety) que aborda cuatro pilares principales de prevención de accidentes: comprometerse con la seguridad de los procesos, comprender los peligros y los riesgos, gestionar el riesgo y aprender de la experiencia.

El primer pilar establece como las organizaciones deben definir y comunicar el nivel de desempeño que aceptaran y cómo deben asegurarse de que se cuente con los recursos necesarios para alcanzar el nivel de desempeño requerido [5]. El segundo pilar, comprender los peligros y los riesgos, indica cómo las organizaciones deben identificar y evaluar los riesgos que se presenten y así asegurar la integridad de sus operaciones. Gestionar el riesgo establece cómo las organizaciones deben implementar y gestionar las medidas de control que han sido identificadas durante la evaluación de riesgos [5]. El último pilar indica cómo las organizaciones deben medir y revisar su cumplimiento con las expectativas planteadas inicial y posteriormente, asegurarse de aprender de estas mediciones y resultados de investigación.

**Tabla 1.**

*Principios de prevención de accidentes de seguridad de procesos y RBPS asociados a elementos.*

<b>Prevención de accidentes de seguridad de procesos</b>	
<b>Pilares y puntos focales</b>	<b>Elementos RBPS</b>
<i>Compromiso con la seguridad de los procesos</i>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Asegúrese de que la gerencia se preocupe y proporcione recursos y un ambiente adecuado.</li><li>• Asegúrese de que los empleados se preocupen.</li><li>• Demostrar compromiso con partes interesadas</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cultura de seguridad de procesos.</li><li>• Cumplimiento de estándares.</li><li>• Competencia en seguridad de procesos.</li><li>• Participación de la fuerza laboral.</li><li>• Alcance de las partes interesadas</li></ul>
<i>Comprender los peligros y los riesgos</i>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Sepa lo que opera.</li><li>• Identificar medios para reducir o eliminar riesgos.</li><li>• Identificar los medios para reducir el riesgo.</li><li>• Comprender el riesgo residual</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Gestión del conocimiento de proceso.</li><li>• Identificación y análisis de peligros y riesgo.</li></ul>
<i>Gestionar el riesgo</i>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Saber operar procesos.</li><li>• Saber mantener los procesos.</li><li>• Controlar los cambios en los procesos.</li><li>• Prepararse, responder y gestionar incidentes.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Procedimientos de operación.</li><li>• Prácticas seguras de trabajo.</li><li>• Integridad y confiabilidad de los activos.</li><li>• Gestión de contratistas.</li><li>• Capacitación y desempeño.</li><li>• Garantía.</li><li>• Gestión del cambio.</li><li>• Disponibilidad operacional.</li><li>• Realización de operaciones.</li><li>• Gestión de emergencias.</li></ul>
<i>Aprender de la experiencia</i>	

- 
- |  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Supervisar y actuar sobre las fuentes internas de información.</li><li>• Monitorear las fuentes externas de información.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Investigación del incidente.</li><li>• Medición y métricas.</li><li>• Auditoría.</li><li>• Revisión administrativa y mejora continua.</li></ul> |
|--|---|
- 

**Nota:** En esta tabla se pueden evidenciar los elementos de los pilares de seguridad de procesos. Tomado de [*Center for Chemical Process Safety, GUIDELINES FOR RISK BASED PROCESS SAFETY. United States of America, 2007*].

Como se pudo evidenciar en la tabla 1 dentro de cada una de las áreas de enfoque hay una serie de elementos que establecen aspectos claves de las operaciones que las organizaciones deben seguir para asegurar la integridad de los procesos.

### 1.3 Gestión de riesgos

Un riesgo se define como el efecto de incertidumbre sobre los objetos[6], de manera que un efecto es una desviación respecto a lo previsto, el cual puede ser negativo, positivo, que puede crear una oportunidad o amenaza. Por lo tanto, la gestión de riesgos se define cómo el proceso de identificación, análisis y respuesta a los diversos factores de riesgo, que permite dirigir y controlar cualquier organización expuesta a riesgos.

El propósito de la gestión del riesgo es la creación y la protección del valor. Mejora el desempeño, fomenta la innovación y contribuye al logro de objetivos [6]. Para cumplir con los objetivos la ISO 31000 establece principios fundamentales descritos en la figura 3, los cuales contribuyen a una gestión del riesgo mucho más eficaz.

**Figura 3.**

*Principios fundamentales de la gestión del riesgo*



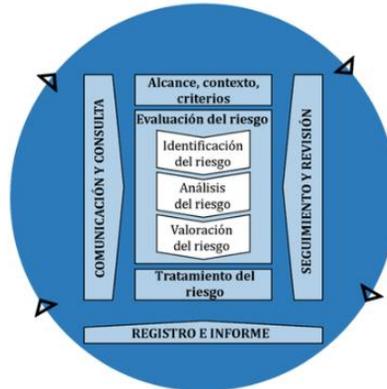
**Nota:** La ilustración representa los principios fundamentales a tener en cuenta para desarrollar una gestión del riesgo eficaz. Tomado de [“ISO 31000:2018, Gestión del riesgo - Directrices.” <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:31000:ed 2:v1:es> (accessed Oct. 15, 2021)].

Siendo parte del tercer pilar de la seguridad de procesos, La gestión del riesgo se centra en tres temas: (1) Operar con prudencia y realizarle mantenimiento a los procesos que generan el riesgo. (2) Gestionar los cambios de los procesos para asegurar que se mantiene el riesgo en niveles tolerables. (3) Preparación para, la respuesta y la gestión de incidentes que se produzcan. De manera que la gestión del riesgo ayuda a una empresa o instalación a desplegar un sistema de gestión que ayuda a mantener operaciones a largo plazo, sin incidentes, y rentables [6]. Además, el sistema de gestión, debe estar compuesto por componentes que guían el pensamiento, permitan el monitoreo y control, orientan la toma de decisiones y establecen un proceso con una serie de actividades concatenadas y coherentes; incluye planeación, organización, liderazgo, funciones de control y se complementa con el esquema de un sistema de entradas-salidas [7]

El proceso de la gestión del riesgo implica la aplicación sistemática de políticas, procedimientos y prácticas a las actividades de comunicación y consulta, establecimiento del contexto y evaluación, tratamiento, seguimiento, revisión, registro e informe del riesgo. Este proceso se ilustra en la Figura 4

**Figura 4.**

*Proceso de gestión de riesgos*



**Nota:** La ilustración representa las partes que se deben abarcar en el proceso de gestión de riesgo. Tomado de [“ISO 31000:2018, Gestión del riesgo — Directrices.” <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:31000:ed 2:v1:es> (accessed Oct. 15, 2021)].

Para desarrollar la gestión del riesgo es importante abarcar los ítems que se encuentra en la figura 4, como lo son: la comunicación y consulta del riesgo, la cual busca promover la toma de conciencia y comprensión del riesgo, mediante una retroalimentación e información para apoyar la toma de decisiones. Luego viene el alcance, contextos y criterios que permiten delimitar los tipos de riesgos que entrarán en estudio. Posteriormente se identifica, analiza y valora el riesgo, lo cual permitirá tratar los riesgos mediante medias correctivas y preventivas. Finalmente se realiza una revisión de la gestión propuesta, realizando un registro e informe de los resultados obtenidos.

- Identificación del riesgo

La identificación del riesgo se centra en encontrar, reconocer y describir los riesgos que pueden ayudar o impedir a una organización lograr sus objetivos. Para la identificación de los riesgos es importante contar con información pertinente, apropiada y actualizada.

- Análisis de riesgo

El análisis del riesgo implica una consideración detallada de incertidumbres, fuentes de riesgo, consecuencias, probabilidades, eventos, escenarios, controles y su eficacia. Un evento puede tener múltiples causas y consecuencias y puede afectar a múltiples objetivos.

- Valoración del riesgo

La valoración del riesgo implica comparar los resultados del análisis del riesgo con los criterios del riesgo establecidos para determinar cuándo se requiere una acción adicional. Esto puede conducir a una tomar una decisión.

### 1.3.1 Riesgos operacionales

Es importante reconocer que existen riesgos que se pueden presentar en las empresas para cumplir con los requerimientos de la industria, asociados a temas como los ingresos y costos operacionales, sin embargo, es necesario identificar problemas potenciales enfocados en el correcto funcionamiento del proceso para así gestionar un proyecto sin contratiempos que generen atrasos y sobrecostos.

Los riesgos operacionales son una serie de riesgos que pueden afectar a las personas, los procesos, las instalaciones, los equipos y la tecnología empleada. Estos se pueden deber a errores de diseño y fallas en la operación, daño de equipos e indisponibilidad de reemplazo, entrega de materiales de bajas especificaciones o con retrasos, accidentes, incumplimiento de la regulación y errores en la divulgación de información [8].

Es necesario realizar inspecciones para diagnosticar las condiciones de trabajo considerando temas de salud y seguridad industrial, para detectar los riesgos que puedan estar relacionados con la operación del proceso y afecten la integridad de las personas. Según los autores del libro *Gestión integral de riesgos*, los factores de riesgo o elementos que generan una capacidad potencial de producir lesiones o daños materiales se catalogan en [8]:

**Tabla 2.**

*Factores de riesgos operacionales*

<b>Riesgos</b>	<b>Factores de riesgo</b>
Físicos	Ruido, vibraciones, presiones anormales, radiaciones ionizantes (rayos X, gama, beta, alfa y neutrones), radiaciones no ionizantes (radiación ultravioleta, visible, infrarroja, microondas y radiofrecuencia), temperatura, e iluminación.

Biológicos	Ingestión de alimentos contaminados, contacto con fluidos corporales, inhalación o ingestión de microorganismos y contacto con macroorganismos.
Químicos	Gases y vapores, aerosoles líquidos y sólidos.
De seguridad	Atrapamiento, golpeado por o contra, proyección de partículas, manipulación de materiales, locativos, caídas, contacto con electricidad (alta y baja tensión, estática), incendios, explosiones, salpicadura de químicos, contacto con objetos calientes, tránsito y prácticas deportivas.
Ergonómicos	Posiciones de pie o sentadas prolongadas, movimientos repetitivos, sobreesfuerzos, hiperextensiones, flexiones repetitivas.
Psicosociales	Conflictos interpersonales, altos ritmos de trabajo, monotonía en la tarea, supervisión estricta, capacitación insuficiente, sobrecarga de trabajo y agresiones.

**Nota:** En esta tabla se pueden evidenciar los factores de riesgo relacionados a la operación de un proceso. Tomado de [Y. Li and F. W. Guldenmund, “Safety management systems: A broad overview of the literature,” Safety Science, vol. 103. Elsevier B.V., pp. 94–123, Mar. 01, 2018. doi: 10.1016/j.ssci.2017.11.016.].

Además, se deben considerar los riesgos externos que puedan potencialmente afectar la operación, tales como catástrofes naturales o agresiones por parte de agentes externos. Estos se caracterizan por tener muy baja probabilidad de ocurrencia y consecuencias que pueden llegar a ser devastadoras [7]. Las catástrofes naturales pueden incluir terremotos, inundaciones, tormentas eléctricas, tornados, incendios forestales, entre otros. Por otro lado, las agresiones por parte de agentes externos incluyen ataques terroristas, atentados, atracos, secuestros, entre otras. Para manejar adecuadamente estos escenarios se debe contar con simulacros y planes de contingencia que permitan evitar o minimizar las consecuencias.

### ***1.3.2 Matriz de riesgo operativo***

Las matrices de riesgo operativo permiten identificar los posibles riesgos que puedan afectar una planta o proceso, cuantificar las consecuencias de la materialización de los mismos y gestionar un plan de contingencia para implementar controles y acciones que disminuyan dichas repercusiones.

Según el autor Carlos Palma, existen principalmente 4 categorías de fuentes de riesgo operativo [9]:

- Personas: Pérdidas relacionadas con el error humano, negligencia, sabotaje, fraude, ambiente laboral desfavorable, entre otras.
- Procesos Internos: Pérdidas por fallas en los procesos, políticas o procedimientos inadecuados que generen la suspensión de servicios o el desarrollo inadecuado de la operación.
- Tecnología de información: Pérdidas debido al uso inadecuado de sistemas de información y tecnologías relacionadas, impactando el desarrollo de las operaciones y servicios.
- Eventos externos: Pérdidas procedentes a la ocurrencia de eventos ajenos al control de la planta que afecten las personas, procesos internos y tecnología de la información, como desastres naturales o atentados.

Al determinar el nivel de riesgo de los eventos se deben relacionar dos variables fundamentales, la probabilidad y el impacto o consecuencias. La probabilidad se refiere a la posibilidad de que el riesgo se materialice, considerando que no hay controles o medidas de mitigación implementados y las consecuencias son el resultado potencial del suceso, ya sea en términos de personas, economía, equipos, instalaciones, infraestructura o medio ambiente. Por lo tanto, para obtener el riesgo se debe definir a priori cuál es la viabilidad de que se materialice el riesgo y a su vez el impacto que provoca sobre las actividades diarias del proceso a analizar [9].

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad} * \text{Consecuencias}$$

Para establecer el rango de probabilidad, se ha decidido utilizar la tabla 3 que presenta una puntuación del 1 al 5, siendo 1 el evento menos frecuente y 5 el más habitual.

**Tabla 3.**

*Parámetros de probabilidad*

<b>Puntuación</b>		<b>Probabilidad</b>	<b>Ejemplo de frecuencia del evento de pérdida</b>
Rara	1	Insignificante, puede ocurrir sólo en circunstancias excepcionales	Una vez cada 30 años o menos frecuente
Inverosímil	2	Podría ocurrir alguna vez	Una vez cada 10 años

Frecuente	3	Debería ocurrir alguna vez	Una vez cada 3 años
Verosímil	4	Probablemente ocurra una vez	Anualmente
Esperada	5	Ocurrirá en muchas circunstancias	Al menos mensualmente

**Nota:** En esta tabla se pueden evidenciar los parámetros de probabilidad y su frecuencia. Tomado de [C. Palma Rodríguez, “¿CÓMO CONSTRUIR UNA MATRIZ DE RIESGO OPERATIVO?,” Universidad de Costa Rica , 2011].

Por otro lado, las consecuencias se evalúan en 6 categorías: Personas, economía, equipos, instalaciones, infraestructura y medio ambiente. Cada categoría cuenta con una valoración de 1 al 5, siendo 5 el evento más trascendental y 1 el más leve.

Para determinar las consecuencias en la categoría de personas, se consideró la tabla 4. Sin embargo, se realizaron modificaciones al construir la matriz de riesgos.

**Tabla 4.**

*Impacto en las personas*

Gravedad		Definición
Escala	Condiciones	
<b>1</b> <b>Insignificante</b>	Lesión leve	Lesiones de primeros auxilios o efectos leves en la salud que no afecten el rendimiento laboral ni causen discapacidad, por ejemplo, lesiones de primeros auxilios, exposición a polvos no peligrosos.
<b>2</b> <b>Menor</b>	Lesión menor	Caso de tratamiento médico, caso de trabajo restringido, lesión con tiempo perdido o efectos menores para la salud (peligros para la salud capaces de efectos menores que son reversibles, por ejemplo, agentes irritantes, agentes desengrasantes, bacterias que envenenan los alimentos) que afectan el desempeño laboral, como la restricción de las actividades laborales o se necesita tomar algunos días para recuperarse por completo.
<b>3</b> <b>Moderado</b>	Lesión Mayor	Incapacidad parcial permanente, efectos significativos en la salud (capaz de daños irreversibles en la salud sin pérdida de vidas, por ejemplo, ruido, tareas de manejo manual deficientes, químicos que causan efectos sistémicos, sensibilizadores), exposición a posibles o carcinógenos animales, o resultados de lesiones/ enfermedades en las

		categorías más bajas (categorías 1 y 2 anteriores) que afectan el desempeño a largo plazo.
<b>4</b>	Muerte única	Invalidez total permanente, fatalidad única por accidente o enfermedad ocupacional o efectos importantes en la salud causados por daño irreversible o con discapacidad grave o muerte, por ejemplo, exposición a corrosivos, carcinógenos, calor y frío extremos, factores de riesgo psicosocial.
<b>5</b>	Múltiples muertes	Muertes múltiples o invalidez total permanente múltiple por accidente o enfermedad ocupacional causada por peligros para la salud con el potencial de causar muertes múltiples, por ejemplo, químicos con efectos tóxicos agudos (sulfuro de hidrógeno, monóxido de carbono), carcinógenos.

**Nota:** En esta tabla se pueden evidenciar los impactos o consecuencias en las personas debido a un riesgo en el proceso. Tomado de [10].

En la categoría de medio ambiente, se consideró el nivel de afectación que pueden causar las sustancias químicas que se utilizaran en el centro de procesos (ver anexo 2) y el área superficial impactada, teniendo en cuenta las acciones y tiempo de remediación, como se evidencia a continuación.

**Tabla 5.**

*Consecuencias en la categoría de medio ambiente*

Consecuencias	Descripción	
	Afectación al medio ambiente	Área superficial impactada
Afectación ambiental irreparable	No hay acciones de remediación	Bienestar Ecocampus
Afectación ambiental dispersa o grave	Acciones de remediación en el largo plazo.	Edificio y zonas aledañas
Afectación ambiental mayor	Acciones de remediación en el mediano plazo.	Edificio de la planta piloto
Afectación ambiental menor	Acciones de remediación en el corto plazo.	Zona de la planta piloto (CEPURE, CETA)
Afectación ambiental leve	Acciones de remediación en el plazo inmediato.	Equipo en el cual se lleva la operación

**Nota:** En esta tabla se puede evidenciar la clasificación de las consecuencias relacionadas en la categoría de medio ambiente.

Por el contrario, las consecuencias de las categorías de economía, equipos, instalaciones e infraestructura se definieron junto al equipo de trabajo del Centro de Procesos. No obstante, para la clasificación del riesgo se contempló la figura 5 y se realizaron ciertas modificaciones.

**Figura 5.**

*Clasificación del riesgo*

Nivel de riesgo	Valor de NR	Significado
I	4000-600	Situación Crítica. Suspender actividades hasta que el riesgo está bajo control- Intervención urgente.
II	500-150	Corregir y adoptar medidas de control de inmediato. Sin embargo, suspenda actividades, si el nivel de riesgo está por encima o igual de 360
III	120-40	Establecer un plan de mejora. Sería conveniente justificar la intervención y su rentabilidad.
IV	20	Mantener las medidas de control existentes, pero se debería considerar soluciones o mejoras y se deben hacer comprobaciones periódicas para asegurar que el riesgo aún se aceptable

**Nota:** En esta ilustración se evidencia la clasificación del riesgo para la matriz de riesgo operativo. Tomado de [Ministerio de Salud y Protección Social, “GUÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS, VALORACIÓN DE RIESGOS Y DETERMINACIÓN DE CONTROLES,” Bogotá, 2021].

Con esta información se construyó la matriz de riesgos operacionales que será utilizada en la valoración de los riesgos planteados en el Centro de Procesos de Ingeniería de la Universidad de América con la herramienta HAZOP.

El eje horizontal representa la medición de la probabilidad de que se materialice el evento, utilizando las letras A, B, C, D y E, dependiendo de que tan raro, inverosímil, frecuente, verosímil o esperado es el evento; considerando que es la probabilidad de que se produzcan las consecuencias potenciales estimadas y no el peligro en sí. Por otro lado, el eje vertical representa las consecuencias contemplando 6 categorías: personas, economía, equipos, instalaciones, infraestructura y medio ambiente, junto a su respectivo valor de 1 a 5, dependiendo de la trascendencia del evento. Para determinar el valor del riesgo y clasificarlo se utilizaron 4 niveles de diferentes colores: bajo (verde), medio (amarillo), alto (naranja) y crítico (rojo).

**Figura 6.**

*Matriz de riesgos operacionales*

							Rara	Inverosímil	Frecuente	Verosímil	Esperada	
							Puede ocurrir sólo en circunstancias excepcionales	Podría ocurrir alguna vez	Debería ocurrir alguna vez	Probablemente ocurra una vez	Ocurrirá en muchas circunstancias	
CONSECUENCIAS	CATEGORÍAS						VALOR	PROBABILIDAD				
	Personas	Economía (COP\$)	Equipos	Instalaciones	Infraestructura	Medio ambiente		A	B	C	D	E
	Una o más fatalidades ó incapacidad permanente por accidente o enfermedad ocupacional	Mayor a 4,000 millones	Pérdida total en la operatividad de los equipos	Pérdida total de las instalaciones del centro de procesos	Pérdida total de la edificación	Afectación ambiental irreparable	5	Medio	Alto	Alto	Crítico	Crítico
	Lesiones mayores con incapacidad permanente o parcial	Mayor a 1,000 millones y menor o igual a 4,000 millones	Pérdida parcial en la operatividad de los equipos y sobrecostos por reparaciones no planificadas	Pérdida parcial en el funcionamiento de las instalaciones y sobrecostos por reparaciones no planificadas	Pérdida parcial de la edificación y sobrecostos por reparaciones no planificadas	Afectación ambiental dispersa o grave	4	Medio	Medio	Alto	Alto	Crítico
	Lesiones menores con tratamiento médico y restricción de actividades laborales o incapacidad parcial	Mayor a 500 millones y menor o igual a 1,000 millones	Afectaciones en los equipos que requieran detener el proceso	Afectaciones en las instalaciones que requieran detener el proceso	Afectaciones en la edificación que requieran detener el proceso	Afectación ambiental mayor	3	Bajo	Medio	Medio	Alto	Alto
	Lesiones leves de primeros auxilios que no afecten el rendimiento laboral ni causen discapacidad	Mayor a 100 millones y menor o igual a 500 millones	Daños menores en los equipos que no requieran detener el proceso	Daños menores en las instalaciones que no requieran detener el proceso	Daños menores en la edificación que no requieran detener el proceso	Afectación ambiental menor	2	Bajo	Bajo	Medio	Medio	Medio
No hay afectaciones a las personas	Menor a 100 millones	Daños leves en los equipos	Daños leves en las instalaciones	Daños leves o superficiales en la edificación	Afectación ambiental leve	1	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	

**Nota:** La figura representa la matriz de riesgos operacionales que se utilizará en la valoración de los riesgos planteados junto a la herramienta HAZOP.

**Figura 7.**

*Significado de la valoración del riesgo*

<b>Riesgo</b>	<b>Significado</b>
<b>Bajo</b>	Mantener las medidas de control existentes, pero se debería considerar soluciones o mejoras y se deben hacer comprobaciones periódicas para asegurar que el riesgo aún se aceptable
<b>Medio</b>	Establecer un plan de mejora. Sería conveniente justificar la intervención y su rentabilidad.
<b>Alto</b>	Corregir y adoptar medidas de control de inmediato. Sin embargo, evaluar si se requiere suspender actividades.
<b>Crítico</b>	Situación Crítica. Suspender actividades hasta que el riesgo está bajo control. Intervención urgente.

**Nota:** En la figura se puede evidenciar el significado de la valoración del riesgo obtenido por la matriz de riesgos operacionales.

Para realizar la evaluación del riesgo se debe:

1. Definir el evento que se desee valorar, cuya materialización represente un riesgo.
2. Analizar que categorías (personas, economía, equipos, instalaciones, infraestructura y medio ambiente) se ven afectadas por el evento. Seleccionar inicialmente una categoría.
3. Estimar las consecuencias que se pueden presentar en la categoría (1 al 5).
4. Determine la probabilidad de que se produzcan las consecuencias (Rara, inverosímil, frecuente, verosímil y esperada).
5. El punto dentro de la matriz que cruza la consecuencia con la probabilidad corresponde a la valoración del riesgo para esa categoría.
6. Repetir el proceso para la siguiente categoría hasta analizar todas las posibles pérdidas
7. Debido a que un evento puede tener consecuencias en las 6 categorías, la valoración del riesgo es determinada con la categoría de consecuencia que tenga la mayor clasificación.
8. Por ejemplo, si la valoración es **5A** significa que el valor en las categorías (personas, economía, equipos, instalaciones, infraestructura y medio ambiente) es 5 y en la probabilidad A (rara).

La matriz de riesgo permite que el personal encargado de la gestión realice un monitoreo y control periódico para verificar que el riesgo identificado en los procesos ha disminuido en su valoración.

#### **1.4 Herramientas y métodos de análisis de riesgos**

Para realizar un análisis de riesgo es necesario primero identificar las posibles desviaciones o riesgos en el proceso, involucrando dos actividades fundamentales: identificar consecuencias indeseables específicas y determinar las características de los materiales, procesos y sistemas que pudieran producir dichas consecuencias. Es esencial que la técnica de identificación de riesgos sea lo suficientemente capaz de identificar todos los riesgos importantes [12].

Herramientas como el What If y el HAZOP permiten llevar a cabo un estudio de evaluación de riesgo, teniendo en cuenta que el alcance y la complejidad de estos estudios serán directamente proporcionales al número y tipo de riesgos identificados y la profundización que se haya realizado. Por otro lado, la metodología Bow-Tie permite gestionar el riesgo de forma dinámica en donde se puedan evidenciar las amenazas, el viento límite y las consecuencias, a la vez que las barreras de mitigación y prevención.

1.3.2.a No basados en escenarios. Los riesgos no basados en escenarios se centran en las experiencias pasadas o del grupo que lleva a cabo el análisis. Generalmente las técnicas que se centran en estos tipos de riesgos son empleadas en fases tempranas del diseño del proyecto y operación.

Algunas técnicas no basadas en escenarios son:

- Análisis preliminar de peligros (APR).
- Revisión de seguridad.
- Ranking relativo.
- Análisis de listas de chequeo. [13]

1.3.2.b Basados en escenarios. Las técnicas que abarcan el campo de los riesgos basados en escenarios se centran en el entorno accidental, con la finalidad de establecer que puede salir

mal en algún evento, esto lleva a establecer barreras de mitigación y protección. Además, son métodos predictivos y analíticos que se aplican a situaciones específicas.

Algunas técnicas basadas en escenarios son:

- Análisis What if...?
- Análisis What if...? / Check-list.
- Hazard and Operability Analysis (HAZOP).
- Análisis de modos de fallo y efectos (FMEA).
- Análisis de árbol de fallas y eventos (FTA y ETA).
- Análisis de causas/consecuencias o corbatín (Bow-Tie). [13]

Para llevar a cabo el desarrollo conceptual del proyecto se profundizó en las técnicas What If, HAZOP y la metodología Bow-Tie

#### ***1.4.1 What If***

La técnica del análisis “What-If” es una metodología que se lleva a cabo por medio de una lluvia de ideas en la cual un grupo de gente experimentada familiarizada con el proceso en cuestión realiza preguntas sobre ciertos eventos indeseables que se pueden presentar en el proceso. Este concepto de análisis “¿Qué pasa sí?” motiva a que el grupo de evaluación de riesgos se pregunte situaciones que comiencen con la frase “Qué pasa sí” [12].

Para aplicar esta herramienta de análisis, normalmente una persona encargada escribe todas las preguntas en una hoja de registro o procesador de palabras. Las preguntas pueden referirse a cualquier condición anormal relacionada con la planta, no sólo con fallas en los equipos, componentes o variaciones del proceso. Posteriormente las preguntas son divididas en diferentes áreas de investigación, como seguridad eléctrica, protección contra incendios, seguridad personal, entre otros. Cada área es analizada por un grupo o por una o más personas con los conocimientos suficientes para realizar esta labor.

El propósito de esta herramienta es la identificación de riesgos, situaciones riesgosas, o eventos accidentales específicos que pudiesen producir una consecuencia indeseable en el proceso. Un grupo experimentado de personas identifica posibles situaciones de accidente,

sus consecuencias, protecciones existentes, y entonces sugieren alternativas para la reducción de los riesgos [12].

Al analizar el proceso, esta técnica usualmente comienza por la recepción de la materia prima y sigue con el flujo normal, hasta el final del mismo (a menos que las fronteras del estudio se establezcan de otra manera en el estudio). Estas preguntas y problemas determinados sugieren a menudo causas específicas para las situaciones de accidentes identificadas.

Estos errores y fallas se pueden considerar durante las operaciones normales de producción, la construcción, actividades de mantenimiento, entre otras. Las preguntas podrían abordar las siguientes situaciones [14]:

- Incumplimiento de los procedimientos
- Procedimientos incorrectos
- Operador no capacitado
- Afectaciones en las condiciones del proceso
- Instrumentación mal calibrada
- Fallas en servicios tales como pérdida de energía, vapor, gas, entre otras

Según el Institute American Chemical Society (ACS) se deben seguir los siguientes pasos para realizar un análisis What If:

- Inicio del equipo: El líder del equipo deberá servir de guía en cada paso del proceso. El líder puede utilizar un diagrama de equipo detallado junto con las pautas de funcionamiento preparadas, como PFD y P&ID los cuales permiten la localización y familiarización de las zonas estudiadas del proceso[15].
- Generar preguntas hipotéticas: El equipo plantea preguntas hipotéticas relacionadas con cada etapa del proceso y cada componente para determinar las fuentes probables de fallas. Al desarrollar las preguntas se puede considerar el potencial del error humano, fallos en los equipos y desviaciones de los parámetros críticos (temperatura, presión, tiempo, caudal, entre otros).

- Evaluar y valorar el riesgo: El equipo considera la lista de preguntas hipotéticas para identificar las posibles fuentes de errores, posteriormente se determina la probabilidad de que estos ocurran y cuáles son las consecuencias.
- Desarrollar recomendaciones: Si el riesgo es considerado inaceptable, el equipo concluye que es necesario tomar medidas correctivas. Por el contrario, si el riesgo es considerado aceptable significa que las probabilidades son muy bajas y las consecuencias no son graves, entonces no es necesario hacer recomendaciones.
- Se debe priorizar y resumir el análisis realizado.
- Asignar acción de seguimiento: Se asignan responsabilidades para las acciones de seguimiento.

Los beneficios de utilizar la herramienta What If es que es fácil de usar, no se necesitan herramientas especializadas, las personas con poca experiencia en análisis de riesgos pueden participar de manera significativa y conduce a una comprensión más profunda [15].

Algunos ejemplos de preguntas hipotéticas pueden ser [14]:

- ¿Qué pasa si la válvula de control falla al abrirse?
- ¿Qué pasa si el operador realiza el paso 2 antes del paso 1?
- ¿Qué pasa si la línea se rompe?
- ¿Qué pasa si el recipiente está vacío?
- ¿Qué pasa si hay un incendio?

Para evaluar el riesgo y hacer recomendaciones no se hará uso de la matriz de riesgos, si no que se utilizará la ilustración 7 y se realizará una evaluación cualitativa considerando el riesgo bajo, medio, alto y crítico junto con sus significados. Por otro lado, se utilizará el siguiente formato:

**Figura 8.**

*Formato para la aplicación de la herramienta What If*

Área del Centro de Procesos	¿Qué pasaría si ...	Consecuencias	Riesgo	Recomendaciones

**Nota:** En la figura se puede evidenciar el formato que se aplicará para implementar la herramienta What If en el Centro de Procesos.

### **1.4.2 HAZOP**

Es una técnica de identificación de peligros y problemas operativos en una instalación industrial. HAZOP es una abreviatura que hace referencia al análisis de “HAZard” (Peligro) y “OPerability” (operabilidad) [16]. Además, se considera que es un examen formal y sistemático de una planta de procesamiento con el fin de determinar posibles desviaciones en el diseño y/o la operación de una instalación nueva o existente, identificando peligros, fallas y problemas de operatividad, para así, evaluar las consecuencias de un mal funcionamiento.

Un análisis HAZOP no solo se concentra en temas de seguridad, sino que también trata de descubrir problemas de “operabilidad” que podrían dar lugar a malos resultados económicos. Ejemplos de problemas de operabilidad podrían ser excesivas operaciones manuales que retrasen la producción, la falta de material suficiente para permitir un inicio, y dispositivos de medición adecuados para permitir que el personal de la planta pueda supervisar y diagnosticar posibles incidentes antes de que ocasionen daños al equipo o grandes pérdidas económicas [17].

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

sin embargo, la operación de base también debe ser evaluada durante el análisis HAZOP [16].

### ***1.1.1 Metodología del HAZOP***

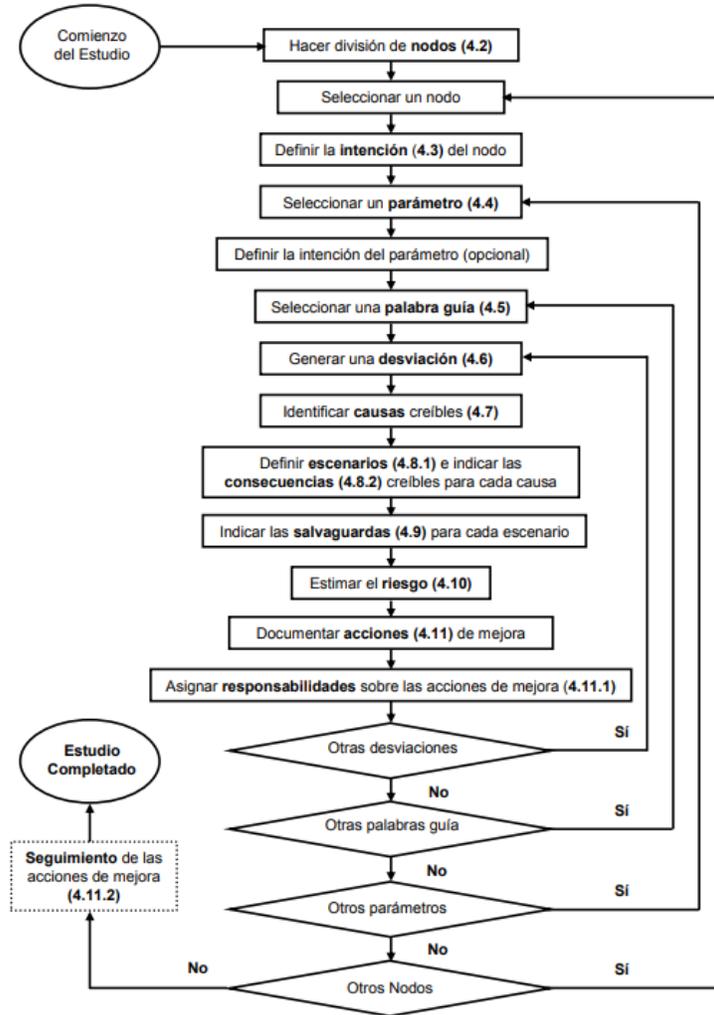
Durante la realización de la técnica de análisis de riesgo y problemas operativos es de suma importancia desarrollar una serie de pasos que llevan a la constitución de un buen estudio HAZOP. Para tal fin en primer lugar se debe contar con la documentación mínima necesaria, de lo contrario el estudio no puede realizarse, ya que la calidad del estudio depende directamente de la cantidad y calidad de información disponible. La información requerida es la siguiente:

- Fichas de seguridad de los insumos y productos químicos empleados en el proceso. Si el proceso abarca un proyecto nuevo es necesario contar con las fichas del proveedor.
- Diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID) y diagramas de flujo de procesos (PFD) que permitan la comprensión del proceso.
- Plot Plan de la instalación y la Descripción del Proceso/Filosofía de Operación [18]
- Documentos descriptivos del proceso y los equipos, tales como manuales de operación, PFD y P&ID. Esta información permite comprender a todo el personal que conforma el estudio el funcionamiento del proceso y su respuesta a las desviaciones en la operación.

Según la “Guía para la realización de estudios HAZOP (Hazard and Operability Analysis)” desarrollada por REPSOL YPF, Se detalla un diagrama de flujo que sintetiza las etapas a seguir en un HAZOP.

**Figura 9.**

*Diagrama de flujo – síntesis de las etapas a seguir en un estudio HAZOP*



**Nota:** En la figura se puede evidenciar el diagrama de flujo que sintetiza los pasos a seguir en un estudio HAZOP. Tomado de [REPSOL YPF, “GUÍA PARA LA REALIZACIÓN DE ESTUDIOS HAZOP (HAZard and OPerability analysis),” 2007].

1.1.1.a Definición de nodos. En la metodología de un HAZOP el proceso se divide en nodos ya que algunos procesos suelen ser complejos y extensos como para evaluarlo globalmente, de esta manera dividirlo en nodos facilita la realización de un análisis más detallado. En cada nodo se analiza un parámetro de operación sea temperatura, caudal, presión entre otros, el

cual se encuentra en un rango de operación o un valor establecido, permitiendo estudiar la desviación del parámetro de operación.

Un nodo puede ser un equipo, un conjunto de equipos, o tubería y equipo; por lo general existen dos tipos: nodos de proceso, los cuales agrupan líneas y equipos, donde se analizan las desviaciones operacionales del proceso. Nodos globales, los cuales agrupan a toda la instalación sujeta al análisis HAZOP para su análisis “de tubería hacia fuera” [19], en cual se analizan las desviaciones provocadas por factores externos al proceso.

1.1.1.b Definición de la intención. Se debe asignar a cada nodo una descripción de la operación segura que se espera del nodo, a esto se le denomina intención. De manera que, para definir la intención del nodo se debe detallar el rango o medida en el cual la variable de operación (temperatura, presión, volumen, etc.) se encuentra en zona segura.

1.1.1.c Selección de los parámetros del proceso. El líder encargado en la dirección del estudio HAZOP debe presentar una selección de parámetros críticos a estudiar en cada nodo, los cuales se discutirán y establecerán para el estudio. Existen dos tipos de parámetros [19]:

- Parámetros específicos. Son variables medibles o detectables, las cuales describen aspectos físicos del proceso, en caso de desviación respecto a las condiciones fijadas en el descriptivo de intención, pueden llevar al proceso a una condición peligrosa en ausencia de salvaguardas.
- Parámetros generales. Agrupa a aquellas situaciones que, cuando son negadas o modificadas cualitativamente, pueden generar en el proceso una condición peligrosa. Estas desviaciones son causa de desviación de parámetros específicos.

La siguiente tabla indica cuales pueden ser algunos de los parámetros específicos y generales dentro de un estudio HAZOP, una vez establecidos es de obligación analizarlos siempre y cuando estos sean aplicables.

**Figura 10.**

*Parámetros específicos y generales para analizar en un estudio HAZOP*

			NODO DE PROCESO	NODO GLOBAL
PARÁMETROS	OBLIGATORIOS	ESPECÍFICOS	NIVEL CAUDAL PRESIÓN TEMPERATURA COMPOSICIÓN FASE	
		GENERALES	SERVICIOS <sup>1</sup> MANTENIMIENTO (por defecto) CONTENCIÓN <sup>2</sup> (por defecto)	SERVICIOS (por defecto) MANTENIMIENTO CONTENCIÓN <sup>3</sup>
	OPCIONALES	GENERALES		IMPLANTACIÓN SUCESO EXTERNO FACTOR HUMANO
			pH VISCOSIDAD TAMAÑO DE PARTÍCULA TRANSFERENCIA MEZCLA AGITACIÓN SEPARACIÓN VELOCIDAD SEÑAL PARO/MARCHA COMUNICACIÓN TIEMPO MEDIDA CONTROL SECUENCIA ALIVIO DESALOJO ESTÁTICA EMERGENCIA EQUIPO DE REPUESTO ADICIÓN REACCIÓN MANTENIMIENTO PRUEBAS INSTRUMENTACIÓN MUESTREO DESCARGA CORROSIÓN / EROSIÓN PURGA /INERTIZADO SEGURIDAD	

**Nota:** En la tabla se encuentran los parámetros específicos y generales para realizar un estudio de HAZOP. Tomado de [REPSOL YPF, “GUÍA PARA LA REALIZACIÓN DE ESTUDIOS HAZOP (HAZard and OPerability analysis),” 2007].

1.1.1.d Palabras Guía. Se debe elegir un conjunto de palabras guía que sean relevantes para la operación que se va a estudiar y luego se aplica sistemáticamente a todas las partes de esa operación. Esto puede implicar la aplicación de las palabras guía a cada línea de proceso dentro de un P&ID, o siguiendo cada etapa de una operación de principio a fin. La elección de las palabras guía adecuadas influirá en gran medida en el éxito del HAZOP en la detección de fallas de diseño y problemas de operatividad [16], estas tienen en cuenta variables operacionales tales como flujo, presión, temperatura, entre otras. A continuación, se muestran algunas de las palabras guía y la estructura básica que debe contener el HAZOP.

**Figura 11.**

*Palabras guía empleadas en un HAZOP*

Inglés	Español	Significado
OBLIGATORIAS		
NO	NO/SIN	Negación de la intención de diseño
MORE	MÁS	Incremento cuantitativo en un parámetro de proceso (cuyo valor es posible medir a través de instrumento)
LESS	MENOS	Incremento cuantitativo en un parámetro de proceso (cuyo valor es posible medir a través de instrumento)
OTHER THAN	OTRO	Sustitución o modificación alternativa en el parámetro analizado
REVERSE	INVERSO	Opuesto a la dirección de proceso prevista o contrario a la acción programada
OPCIONALES		
AS WELL AS ALSO	ADEMÁS/QUÉ MÁS EN TAMBIÉN	Incremento o modificación cualitativa
PART OF	PARTE/PARCIAL	Decremento o modificación cualitativa

**Nota:** La ilustración representa algunas de las Palabras guía empleadas en un HAZOP. Sin embargo, en el anexo I de la guía de desarrollo del HAZOP propuesta por Repsol se incluye un listado de palabras guía que puede ser usado como referencia. Tomado de [REPSOL YPF, “GUÍA PARA LA REALIZACIÓN DE ESTUDIOS HAZOP (HAZard and OPerability analysis),” 2007].

1.1.1.e Planteamiento de las desviaciones. Las desviaciones se deben plantear combinando las palabras guía junto con los parámetros del proceso, estas deben tener sentido, para ello es necesario tener en cuenta ciertas incompatibilidades entre algunas palabras guía y parámetros.

$$\text{Palabra guía} + \text{Parámetro del proceso} = \text{Desviación}$$

En la guía propuesta por Repsol se tiene la siguiente tabla que especifica las palabras guía que pueden llegar a ser aplicadas a los principales parámetros obligatorios que hay que analizar:

**Figura 12.**

*Palabras guía aplicadas a los parámetros a analizar*

	NO/SIN (NO)	MAS (MORE)	MENOS (LESS)	ADEMÁS / QUÉ MÁS EN (AS WELL AS)	PARTE / PARCIAL (PART OF)	INVERSO (REVERSE)	OTRO (OTHER THAN)
NIVEL		■	■				
FLUJO	■	■	■	□		■	
PRESIÓN		■	■				
TEMPERATURA		■	■				
COMPOSICIÓN				□	□		■
FASE				□	□		■
SERVICIOS	■			□	□		
OPERACIÓN				■	□		□
CONTENCIÓN	■						
IMPLANTACIÓN				■	□		
SUCESO EXTERNO				■			
FACTOR HUMANO				■			

■ Desviaciones de aplicación obligatoria

□ Desviaciones de aplicación opcional

**Nota:** La ilustración presenta las palabras guías junto a ciertos parámetros que se deben analizar el desarrollo del HAZOP. Tomado de [REPSOL YPF, “GUÍA PARA LA REALIZACIÓN DE ESTUDIOS HAZOP (HAZard and OPerability analysis),” 2007].

1.1.1.f Planteamiento de las causas. Es el proceso más influyente en el estudio HAZOP y en donde se deben plasmar todas las causas responsables en la desviación de los parámetros de proceso. Existen tres tipologías básicas de causas que entran a ser analizadas.

- Fallas de los equipos o instrumentos
- Fallos por error humano
- Eventos externos

Cada causa encontrada y discutida puede dar lugar a distintos escenarios y consecuencias en función de los eventos o circunstancias. Las causas deben dar información sobre el modo de fallo considerado en los equipos o instrumentos, indicando claramente en que posición opera el elemento causante de la desviación (válvula abierta o cerrada, bomba en marcha o paro, error de operador que deja una válvula cerrada o abierta) [19].

Por otra parte, es importante que las causas se detallan claramente en el estudio, ya que en ocasiones las causas pueden ser similares, pero difieren en las consecuencias. En estas

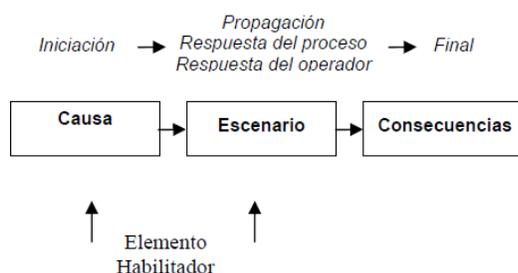
circunstancias, es necesario distinguir y tratar cada causa por separado. Por ejemplo, la falla de una bomba debido a una causa mecánica puede provocar la pérdida de contención, así como la pérdida de flujo, mientras que la falla de la bomba debido a una causa eléctrica puede provocar simplemente una pérdida de flujo [20]

Las causas deben ser creíbles, una causa es creíble cuando esta se rige bajo la experiencia (forma directa), referencia de terceros o en la mayoría de los casos por razonamiento lógico (evidencia del riesgo).

1.1.1.g Escenarios y consecuencias. Para identificar un escenario manera se debe tener presente que situaciones pueden ocasionar un daño dentro del proceso, de que un escenario puede expresarse como una situación de accidente con consecuencias evidentes. Para que exista un escenario de peligro debe antes haber una causa o suceso iniciador, el cual es el origen de la situación de peligro, posteriormente se generan las consecuencias del peligro. La interrelación de los elementos mencionados se muestra en el siguiente esquema [19].

**Figura 13.**

*Relación entre la causa, escenario y consecuencias*



**Nota:** En la figura se evidencia la interrelación que existe entre la causa, el escenario y las consecuencias en el desarrollo de un HAZOP. Tomado de [REPSOL YPF, “GUÍA PARA LA REALIZACIÓN DE ESTUDIOS HAZOP (HAZard and OPerability analysis),” 2007].

En el esquema los elementos habilitadores hacen referencia a las circunstancias que permiten que el escenario de peligro se desarrolle y derive hacia consecuencias con resultado de daño.

La determinación de las consecuencias se da una vez identificados los escenarios de peligro, los cuales pueden generar:

- Efectos sobre la salud de los trabajadores.
- Efectos sobre la salud del público situado en el exterior a la instalación.
- Impacto ambiental
- Daño a la propiedad (infraestructura, equipos e instalaciones).

1.1.1.h Salvaguardas. Una vez establecidas las causas, el escenario y las consecuencias, se deben analizar todas las salvaguardas disponibles en la instalación identificando su propósito dentro del equipo o proceso, es decir si actúan sobre: causas, eventos habilitadores, mitigación de consecuencias. Las salvaguardas se clasifican en:

- Salvaguardas de prevención, las cuales se destacan por reducir la frecuencia de ocurrencia. En el apartado organizativo se encuentran, procedimiento operativo, instrucciones escritas antes de la puesta en marcha de operación; inspección de campo; mantenimiento. En las técnicas se encuentran, válvulas de alivio; Discos de ruptura, sistemas de despresurización, sistema básico de control de procesos.
- Salvaguardas de mitigación, las cuales se centran en la limitación de las consecuencias. En el apartado organizativo se encuentran, procedimientos o protocolos de emergencia, planes de emergencia al interior y exterior en las instalaciones. En las técnicas se encuentran, sistemas contra incendios, válvulas de corte de emergencia, drenaje, contención, entre otros.

1.1.1.i Evaluación del riesgo. Tras la realización del estudio HAZOP surge la necesidad de valorar el riesgo, ya que debe tenerse un acercamiento a la probabilidad de ocurrencia de los peligros identificados y a pequeños rasgos la magnitud que estos puedan producir, en la infraestructura, equipos, afectaciones al personal o al medio ambiente, de manera que en posteriores estudios HAZOP que se realizarán en el centro de procesos e innovación para la industria sostenible ingeniería (CEPIIS) en la universidad de américa se empleará la matriz de riesgos desarrollada en el apartado 1.3.2 Matriz de riesgo, la cual permitirá valorar el riesgo detallado en el estudio HAZOP.

1.1.1.j Recomendaciones y registro de acciones. Las recomendaciones surgen como una necesidad para reducción o mitigación de las consecuencias identificadas durante el desarrollo del estudio en cada escenario de peligro. Una vez generadas las recomendaciones cada miembro del equipo debe juzgar si las recomendaciones propuestas son suficientes para reducir el riesgo a un nivel aceptable. Estas recomendaciones deben ser claras para que otras personas puedan interiorizar y aplicarlas, además no se debe considerar finalizado el estudio HAZOP hasta que todas las acciones de mejora y las recomendaciones hayan sido efectuadas o contestadas en un lapso límite.

1.1.1.k Estructura empleada en un HAZOP de procesos. Finalmente, toda la información detallada explicada en los pasos anteriores debe plasmarse en una tabla que recoge el estudio realizado, como se observa en la figura 15, el cual es el modelo expuesto por REPSOL YPF S.A “Guía para la realización de estudios HAZOP (Hazard and Operability Analysis)”.

**Figura 14.**

*Estructura empleada en un HAZOP de procesos*

REPSOLYPF, S.A.		ESTUDIO DE PELIGROS Y OPERABILIDAD ( <i>Hazard and Operability study - HAZOP</i> )										
Proyecto: ...										P&IDs: ...		
Nodo: (n) ...										Revisión: ...		
Intención del nodo: ...										Fecha: ...		
Parámetro: (*) ...		Intención del parámetro: ...										
Palabra guía	Desviación	Causas	Escenario	Consecuencias	Salvaguardas	C	P	E	R	Acciones	Por	Ref.

**Nota:** La ilustración representa la estructura básica empleadas en un HAZOP. Tomado de [V. Gupta and H. Y. Charan, “Hazard Operability Analysis (HAZOP): A Quality Risk Management tool”, [Online]. Available: [www.ich.org](http://www.ich.org)].

### 1.4.3 Metodología Bow-Tie

La metodología Bow-Tie permite dar una mejor descripción de la situación actual en donde ciertos riesgos están presentes, de esta forma las personas pueden entender más fácilmente la

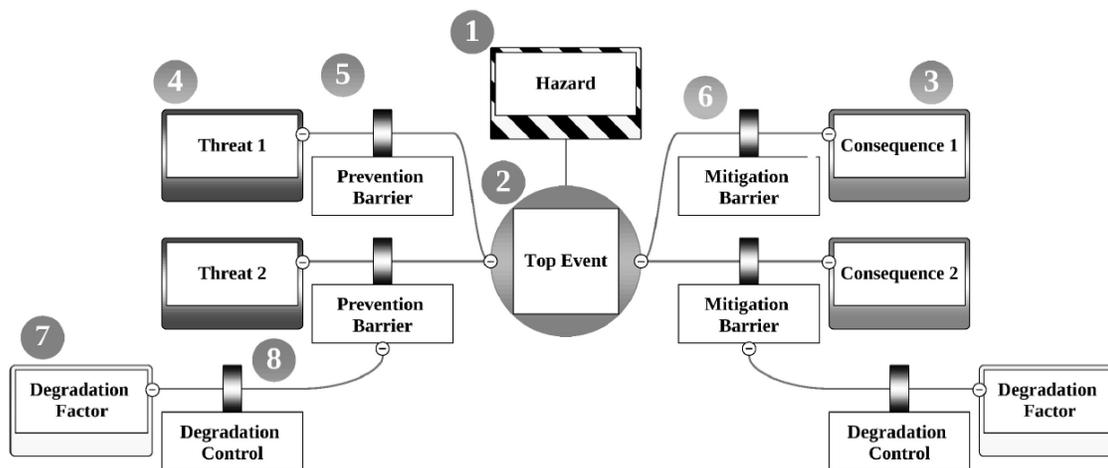
relación entre los riesgos y los eventos que se pueden presentar, ya que describe las relaciones entre las amenazas o causas, barreras, factores de escalabilidad, controles, consecuencias, medidas de recuperación y tareas críticas de seguridad. Esta metodología resulta de la combinación de dos diferentes técnicas, un árbol de fallas analizando las causas de un evento y un árbol de eventos analizando las consecuencias.

El Bow-Tie o corbatín ilustra la relación que existe entre el evento límite y las causas y consecuencias asociadas al mismo [21]. El evento límite se ubica en el centro del diagrama, en la parte izquierda del Bow-Tie se reflejan las causas que conducen al evento, mientras que en la parte derecha se muestran las consecuencias potenciales que se derivan de la ocurrencia del evento límite.

El CCPS junto al Energy Institute indican los elementos presentes en un corbatín en el libro “*BOW TIES IN RISK MANAGEMENT*” como se puede evidenciar a continuación:

**Figura 15.**

*Elementos básicos de un diagrama Bow-Tie*



**Nota:** La ilustración muestra los elementos básicos que debe contener un diagrama Bow-Tie. Tomado de [CCPS, “BOW TIES IN RISK MANAGEMENT,” London, 2018. [Online]. Available: www.wiley].

La siguiente enumeración hace referencia a los elementos presentes en el Bow-Tie.

1. Peligro: El peligro es una operación, actividad o material con el potencial de causar daño. Son presentados en el diagrama con el fin de proporcionar información al lector sobre a fuente del riesgo. Es importante recalcar que los peligros se deben describir en su estado

controlado, además de agregar detalle para determinar el alcance y el nivel de detalle deseado con la metodología.

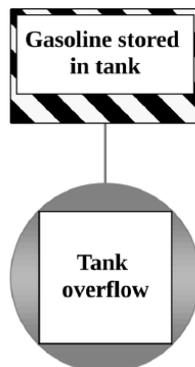
Un ejemplo de peligro según el CCPS puede ser “Propano presurizado almacenado en esfera” ya que el estado operativo normal está definido y el volumen en la esfera será conocido por quienes usen el corbatín.

2. Evento límite: Es el momento en el que se pierde control sobre el peligro, liberando su potencial daño debido a ciertas causas o amenazas. Es posible identificar diversos eventos principales para un peligro, por lo tanto, es posible tener varios corbatines con diferentes eventos límite, pero con el mismo peligro.

Para demostrar la formulación del evento límite, la figura 17 describe el peligro “Gasolina almacenada en un tanque” cuya descripción está en su estado controlado y el evento límite es “Desbordamiento del tanque”, que no es una consecuencia si no el evento principal.

**Figura 16.**

*Ejemplo de un evento límite y peligro*



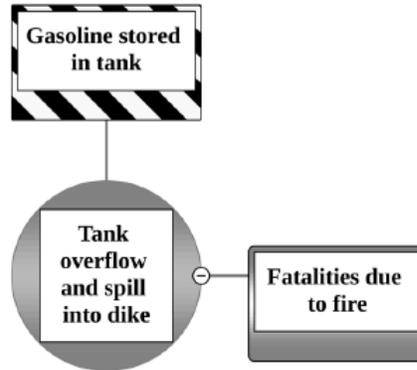
**Nota:** En la figura se puede evidenciar el peligro y su respectivo evento límite. Tomado de [CCPS, “BOW TIES IN RISK MANAGEMENT,” London, 2018. [Online]. Available: [www.wiley](http://www.wiley.com)].

3. Consecuencias: Las consecuencias son resultados no deseados que podrían resultar del evento límite y provocar daños o perjuicios [12]. Es posible que un evento pueda tener múltiples consecuencias, pero solo se analizarán las consecuencias más relevantes. Además, por medio de la matriz de riesgos operacionales se puede mostrar la gravedad o daño que una consecuencia puede causar y su probabilidad.

A continuación, se presenta el ejemplo de una consecuencia causada por el evento límite del desbordamiento del tanque:

**Figura 17.**

*Ejemplo de una consecuencia*



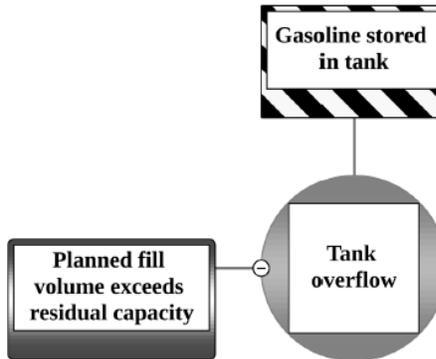
**Nota:** En la figura se puede evidenciar una consecuencia causada por el evento límite del desbordamiento del tanque que almacena gasolina. Tomado de [CCPS, “BOW TIES IN RISK MANAGEMENT,” London, 2018. [Online]. Available: [www.wiley.com](http://www.wiley.com)].

4. Amenazas: Son las posibles razones por las cuales se da la pérdida de control del peligro que conducen al evento límite. Normalmente existe varias amenazas involucradas en un diagrama, cada una representando un único escenario que podría conducirlo directa e independientemente. Según el CCPS existen 3 categorías que son útiles para identificar las amenazas [22].
  - El equipo no funciona dentro de los límites operativos normales, como una falla mecánica en el sello de la bomba.
  - Afectaciones por influencia ambiental, como sobrepresión debido al calentamiento por el sol de tuberías bloqueadas.
  - Problemas de índole operativo, como falta de personal para las barreras humanas necesarias en el arranque de la unidad.

Un ejemplo de amenaza para el desbordamiento del tanque de gasolina es “El volumen de llenado planeado excede la capacidad residual” como se evidencia en la figura 19.

**Figura 18.**

*Ejemplo de amenaza*



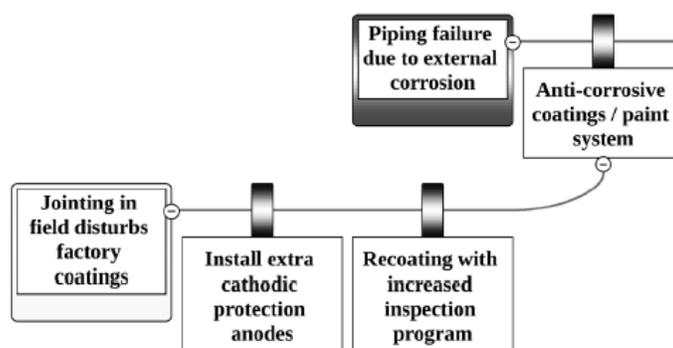
**Nota:** En la figura se presenta una amenaza que provoca el evento límite del desbordamiento del tanque que almacena gasolina. Tomado de [CCPS, "BOW TIES IN RISK MANAGEMENT," London, 2018. [Online]. Available: [www.wiley.com](http://www.wiley.com)].

5. Barreras de prevención: Son las que tienen la posibilidad de prevenir que ocurran las amenazas o de detener la amenaza antes de escalar a un evento límite. Se ubican en la zona izquierda del corbatín. Una prueba clave para una barrera de prevención es que debe ser capaz de detener por completo el evento principal por sí sola [12]. Sin embargo, se ha visto que en algunas industrias se aceptan barreras de prevención que no necesariamente previenen el evento, si no que reducen la probabilidad de que se materialice.
6. Barreras de mitigación: Se emplean después de que ha ocurrido el evento límite y permiten controlar o mitigar su potencial afectación. Se ubican en la zona derecha del corbatín. Estas barreras pueden evitar que ocurran las consecuencias o reducir la magnitud de estas.  
Las barreras de prevención y mitigación deben ser efectivas, independientes y auditables, y si están activas deben contener todos los elementos para detectar, decidir y actuar [22].
7. Factores de degradación: Es una condición o causa directa que puede reducir la efectividad de la barrera debilitándola. Cabe aclarar que un factor de degradación no causará directamente el evento límite o la consecuencia, pero puede aumentar la probabilidad de que estas ocurran al degradar la barrera de la ruta principal.
8. Controles de degradación: Son las medidas que controlan a los factores de degradación y evitan que estos afecten a las barreras de prevención y mitigación.

A continuación, se presenta un ejemplo de factores y controles de degradación en donde la amenaza es “falla de tubería debido a la corrosión externa” y la barrera de prevención son “recubrimientos anticorrosivos / sistema de pintura”. Como se puede observar, existe un factor de degradación que es “las juntas en el campo alteran los revestimientos de fábrica”, sin embargo, cuenta con dos controles que evitan que afecte a la barrera de mitigación: “instalar ánodos de protección catódica adicionales” y “repintando con mayor programa de inspección”.

**Figura 19.**

*Ejemplo de factores y controles de degradación*



**Nota:** En la figura se evidencia la amenaza, la barrera de prevención, el factor de degradación y los controles de degradación. Tomado de [CCPS, “BOW TIES IN RISK MANAGEMENT,” London, 2018. [Online]. Available: [www.wiley](http://www.wiley.com)].

Por último, es necesario resaltar que el estudio HAZOP es uno de los documentos necesarios para poder formar el diagrama BOW-TIE. Del estudio HAZOP podemos sacar información, acerca de cómo sería el peligro, el evento límite, las amenazas, consecuencias y las barreras de prevención, entre otros [24]

Algunos beneficios de esta metodología son que permite documentar el análisis de riesgos de forma sistemática permitiendo el fácil entendimiento por el personal involucrado, está alineado con la ejecución de auditorías de sistemas de gestión, promueve la visibilidad y atención de los peligros y gestión de riesgos, y permite un monitoreo constante de la situación actual de las barreras y controles asociados.

## 2. ZONAS DE RIESGO EN LA PLANTA PILOTO

El Centro de procesos e innovación para la industria sostenible (CEPIIS) ubicado en la sede Eco-campus de la Universidad de América cuenta con diversas zonas para que los estudiantes, maestros y empresas interesadas puedan desarrollar diferentes procesos a escala piloto.

Las zonas de las cuales se compone el centro de procesos son: Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE) constituido por un extractor líquido-líquido, secador de bandejas, columna de destilación y columna de absorción; Centro de servicios industriales (CESI) constituido por compresores, planta térmica, PTAR – PTAI, gases especiales y torre de enfriamiento; Centro de transformación y adecuación (CETA) constituido de un banco de reactores, tren de evaporadores, molino y filtro prensa; Centro de optimización y control (COCO) constituido por tableros y cuarto de control; Centro de calidad y procesos biológicos (BIOCAL) constituido de un laboratorio de procesos biológicos, tableros y cuarto de control.

Para el desarrollo de este documento, solo se considerarán las zonas de CEPURE y CETA puesto que actualmente son los equipos que se encuentran adquiridos por la universidad y cuentan con los manuales de operación y P&ID's necesarios para los análisis de HAZOP y Bow-Tie.

**Figura 20.**

*Render del Centro de procesos e innovación para la industria sostenible (CEPIIS)*



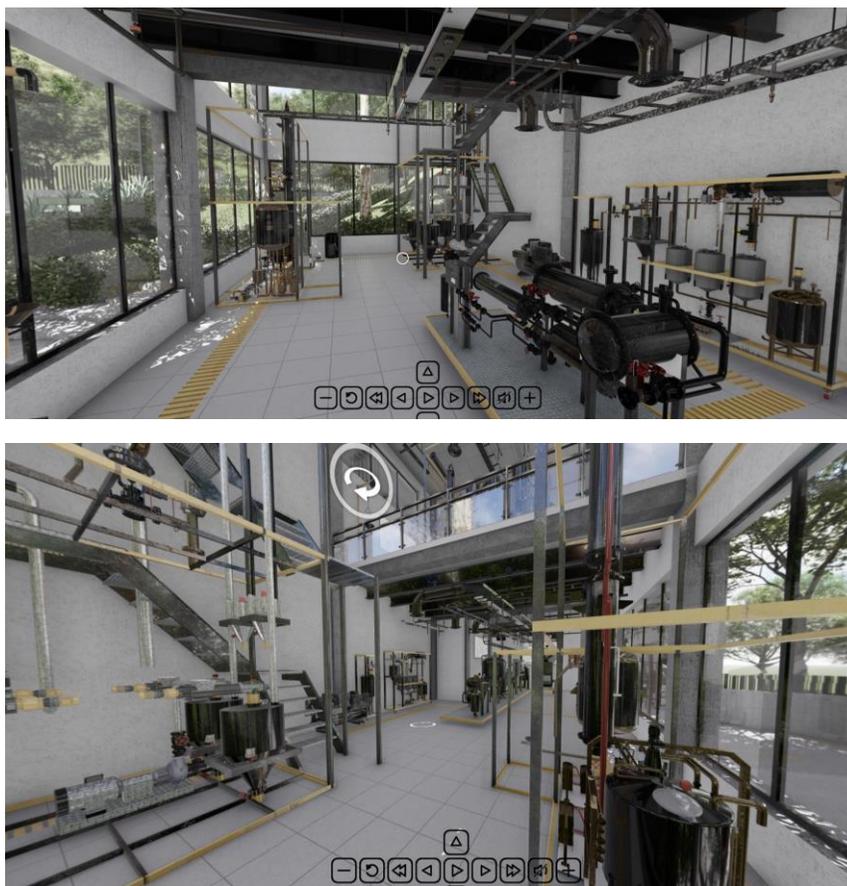
**Nota:** En la figura se evidencia el Render del CEPIIS. Tomado de [Equipo CEPIIS, “Renders Centro de procesos de innovación para la industria sostenible (CEPIIS),” Fundación Universidad de América. 2022]

## 2.1 Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE)

El Centro de Procesos de la Universidad de América cuenta con diferentes zonas integradas como lo es el Centro de purificación y refinación de producto. En esta zona se busca producir una sustancia o material con un elevado porcentaje de pureza o con cantidades controladas de impurezas, teniendo en consideración que algunas de estas impurezas pueden tener un valor comercial. Para ello, los procesos de purificación y refinación se basan en el principio de que los elementos se distribuyen de manera diferente entre distintas fases y que estas fases pueden separarse por métodos físicos.

**Figura 21.**

*Render del Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE)*



**Nota:** En la figura se evidencia la ubicación de los equipos en el centro de purificación y refinación. Tomado de [Equipo CEPIIS, “Renders Centro de procesos de innovación para la industria sostenible (CEPIIS),” Fundación Universidad de América. 2022]

Como se puede observar en la figura 22, el centro cuenta con una columna de destilación ubicada en, una columna de absorción, un secador y un extractor líquido – líquido. A continuación, se mencionarán los equipos considerando el diseño, operación, normativa y algunos peligros relacionados.

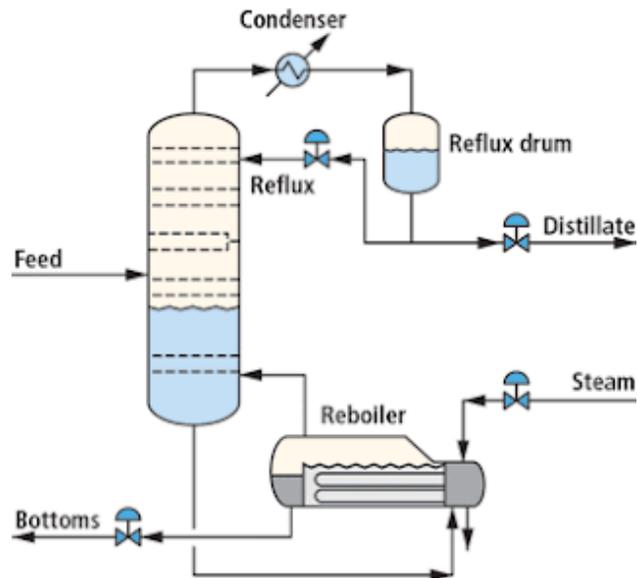
### ***2.1.1 Columna de destilación***

El principio de operación de una columna de destilación está fundamentado en la diferencia de volatilidades entre dos o más compuestos. Por lo tanto, cuando se tiene una mezcla y esta se calienta hasta su punto de burbuja, se generan dos fases en equilibrio (líquido/vapor) cuya composición es diferente a la del líquido inicial. Posteriormente, tras la remoción del vapor generado y su condensación, se obtiene una mezcla del compuesto más volátil y la mezcla líquida que se somete a evaporación se concentra continuamente en el compuesto más pesado obteniendo un residuo rico en contenido de componentes pesados.

La columna de destilación permite realizar este proceso, puesto que cuenta con dos zonas separadas por el punto de alimentación; en la primera zona se realiza un despojamiento en donde el vapor generado en el rehervidor asciende llevando consigo a los componentes más livianos que entraran a la columna junto con el alimento. La segunda zona hace referencia al enriquecimiento, en donde el vapor se pone en contacto con el líquido que proviene del refluo y posteriormente, este lleva hacia el fondo los componentes pesados que pueden contaminar la fase de vapor.

**Figura 22.**

*Ilustración de una columna de destilación*



**Nota:** En la figura se puede observar la estructura de una columna de destilación. Tomado de [Yan Chota Castillo, “SIMULACIÓN DE PROCESOS QUÍMICOS - Diseño, simulaciónyoptimización,”2014.<http://processimulation.blogspot.com/2014/> (accessed Mar. 28, 2022)]

2.1.1.a Diseño de la columna de destilación. Según el manual de operación dispuesto por Process Solutions and Equipment (PSE), la unidad está compuesta por el sistema de alimentación, la columna de destilación, el sistema de condensación y reflujo, los tanques de acumulación de destilado, medidores y el tablero de control. Puede ser utilizado para destilación tradicional, extractiva y azeotrópica en mezclas ideales y no ideales.

El sistema de alimentación consta de dos tanques cilíndricos de acero inoxidable con su respectiva bomba dosificadora de carga, en donde uno de los tanques corresponde a la mezcla problema y el otro usado por el solvente. El flujo de alimentación se conduce por bomba a través de un intercambiador de calor de tubos que cuenta con sensores de temperatura a la entrada y salida del flujo de proceso [27].

La columna de destilación está construida con 3 secciones principales con posibilidad de alimentación en cada una y dos cabezales. La altura total del sistema es de 6 m aproximadamente incluyendo los soportes, tanques, estructura y condensador. Cada sección

está llena de empaque al azar de alta eficiencia en acero inoxidable y a su vez cuenta con 3 tomas de muestras para la fase líquida, 3 sensores de temperatura, y un visor de vidrio. Además, la columna cuenta con un sensor de presión en los fondos que está conectado por cables al tablero de control. Por otro lado, la sección inferior de la columna cuenta con una entrada para el vapor y una salida por la parte inferior con válvula para descarga y purga de la columna, y la sección superior de la columna cuenta con una salida de vapor, y una entrada de retorno de reflujo con válvula de acero inoxidable [27] .

El rehervidor es un contendedor de acero inoxidable con dos conexiones de entrada para retorno de la columna y alimentación, acoples para termocupla, sensor de presión, y una conexión para operación en destilación simple. En este equipo, el producto de fondos se envía a través de un enfriador y se almacena en un tanque colector de hacer inoxidable.

El sistema de condensación y reflujo consta de un intercambiador de coraza y tubos, un visor de condensación, un tanque de acumulación de reflujo con su respectiva bomba y dos tanques cilíndricos simétricos a modo de colectores. Por otro lado, el tanque de reflujo cuenta con conexiones de entrada, de alivio y de descarga con válvula [27]. El tanque está acoplado a una bomba para así enviar el reflujo al tope de la columna y el destilado se envía a un enfriador y se almacena en dos tanques colectores.

El sistema de medidores y controladores cuenta con regulación manual de los flujos de alimentación de reflujo y de vapor por medio del uso de válvulas de aguja o globo, y rotámetros para líquidos previamente calibrados [27]. Para medir las temperaturas en diferentes puntos del proceso se usan termocuplas tipo J o K y los sensores de presión son transductores de alta precisión. La información de los sensores se lleva a un PLC que se encuentra localizado en el tablero de control. Cabe aclarar que el sistema puede contar con calentamiento eléctrico o por vapor de servicio.

Finalmente, el tablero de control permite evidenciar los indicadores de temperatura, las bombas de alimentación de reactivos y la bomba de reflujo. Este cuenta con un interruptor principal y parada de emergencia.

**Figura 23.**

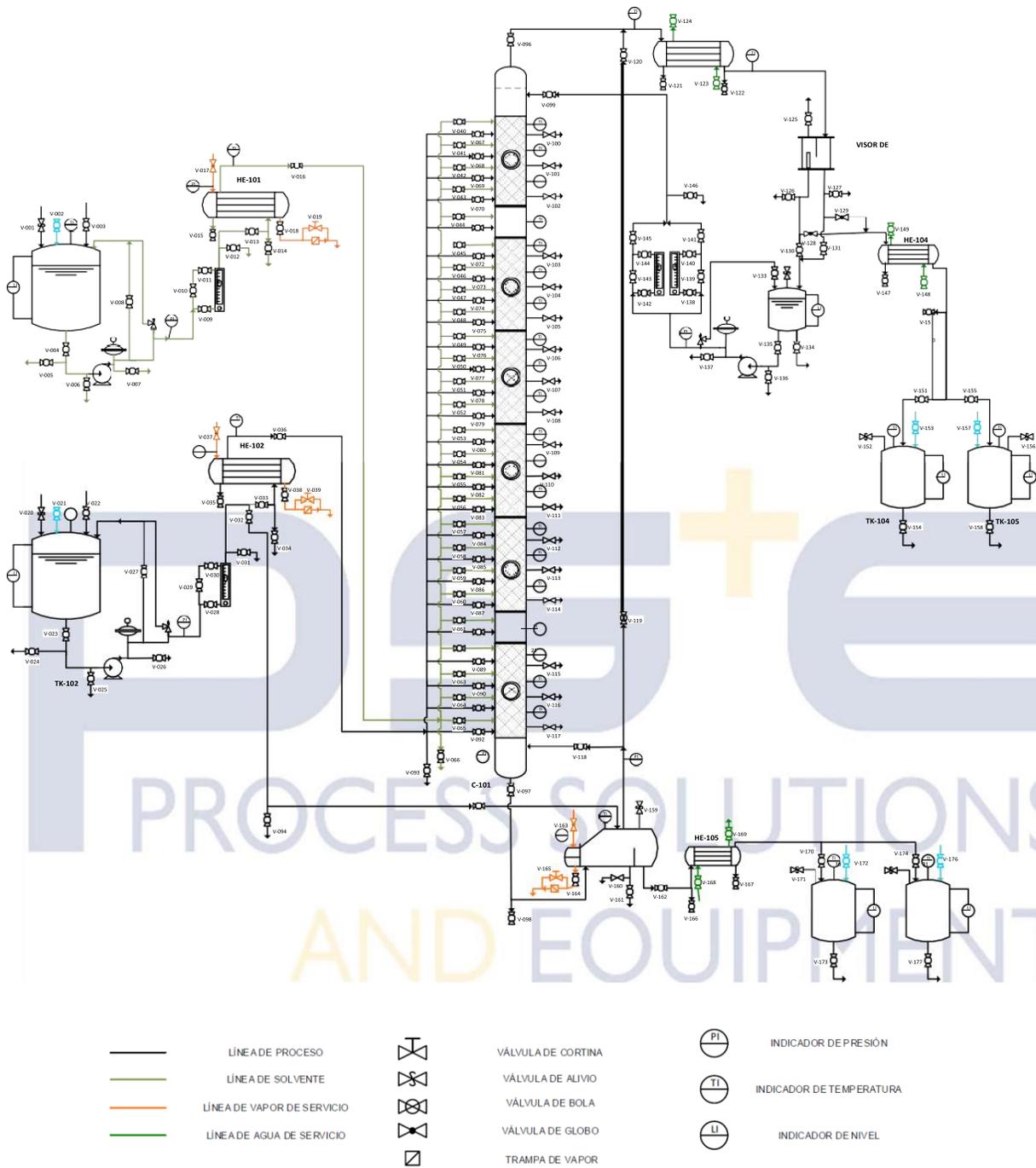
*Columna de destilación del Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE)*



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

**Figura 24.**

*Diagrama de la columna de destilación del Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE)*



**Nota:** En la figura se evidencia un diagrama P&ID de la columna de destilación del Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE). Tomado de [PSE, “Manual de operación Planta de destilación continua,” vol. 01. 2018.]

Es importante considerar el uso de sustancias químicas que sean compatibles con los materiales de construcción de los equipos y accesorios. Para ello se debe tener en cuenta que para la columna de destilación debe ser compatible con Viton ya que es el material de los sellos y empaques, como se observa en el anexo 2.

#### 2.1.1.b Operación de la columna de destilación.

##### - Destilación convencional:

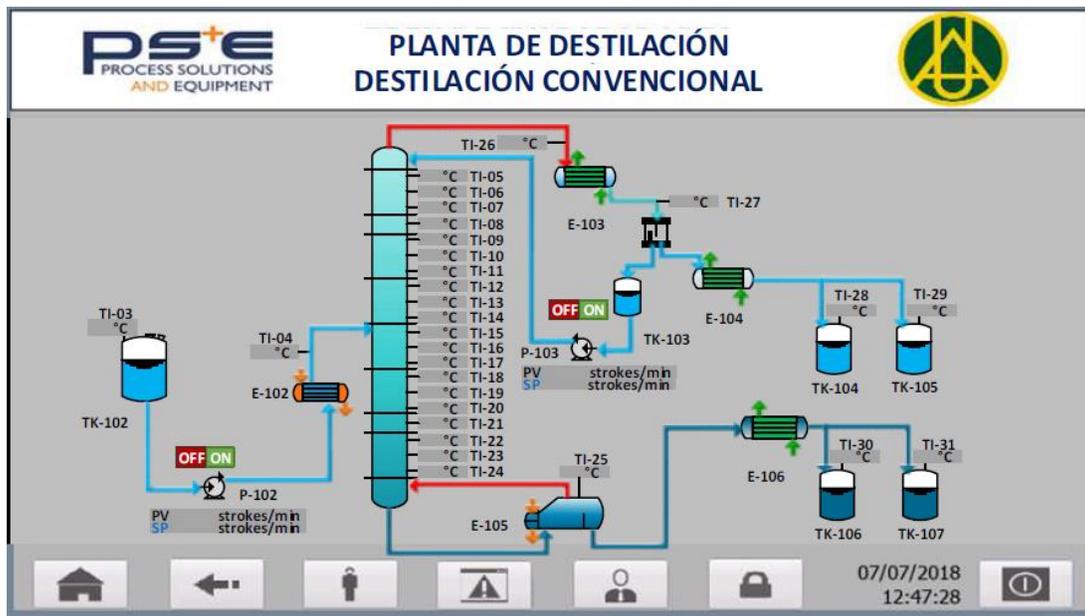
Según el manual de operación de PSE, para la operación de la columna de destilación convencional primero se debe permitir el paso del alimento hacia el rotámetro abriendo la válvula que conecta el tanque a la bomba y las válvulas de entrada y salida del rotámetro. Después se debe verificar que la válvula de alimentación al rehervidor esté cerrada y abrir la válvula de entrada de alimento al precalentador y la válvula de salida del precalentador.

Posteriormente se selecciona el punto de alimentación que se utilizará y se debe abrir la válvula correspondiente a ese punto. Abrir el rotámetro de alimentación, fijar el flujo de alimentación y regular el flujo de reflujo. A continuación, abrir la válvula de salida de condensado del precalentador y la válvula de entrada de vapor al precalentador. También se deben abrir las válvulas que permiten el paso de destilado al enfriador de la cima y las válvulas de entrada y salida del agua de enfriamiento.

Abrir la válvula de paso a uno de los tanques colectores de cima y regular el flujo de reflujo verificando que el nivel en el tanque de acumulación se mantenga estable. Después se debe abrir el paso del producto de fondos hacia el enfriador de fondos y abrir la válvula de entrada a uno de los colectores de fondos. Finalmente se deben tomar las muestras deseadas empleando las válvulas.

En caso de que los tanques colectores de cima o fondos alcancen el 80% de su capacidad, y se requiera continuar con la operación, se debe cambiar de tanque colector [27].

Figura 25. Operación de la columna de destilación convencional



**Nota:** En la figura se puede observar el modo de operación de la columna de destilación convencional. Tomado de [PSE, “Manual de operación Planta de destilación continua,” vol. 01. 2018.]

- Destilación extractiva

Según el manual de operación de PSE primero se debe permitir el paso de alimento hacia el rotámetro abriendo la válvula que conecta el tanque a la bomba y las válvulas de entrada y salida del rotámetro, después verificar que la válvula de alimentación al rehervidor se encuentre cerrada y abrir la válvula de entrada de alimento al precalentador y la válvula de salida del precalentador. Se debe seleccionar el punto de alimentación que se utilizará y abrir la válvula correspondiente. Posteriormente abrir totalmente el rotámetro de alimentación para permitir el flujo hacia el precalentador.

A continuación, se debe permitir el paso de solvente de extracción hacia el rotámetro y abrir la válvula de entrada de solvente al precalentador y la válvula de salida del precalentador. Seleccionar el punto de alimentación que se desea emplear y abrir la válvula necesaria. Después se debe abrir el rotámetro de alimentación de solvente para permitir el flujo hacia el precalentador de solvente y encender la bomba de alimentación y la bomba de alimentación del solvente. Fijar los flujos de alimentación y regular el flujo de reflujo. Próximamente en el precalentador de alimento abrir la válvula de salida de condensado y la válvula de entrada de vapor al precalentador.

En el precalentador de solvente abrir la válvula de salida de condensado y la válvula de entrada de vapor al precalentador. Al mismo tiempo que se regula el vapor, se debe abrir las válvulas que permiten el paso al enfriador de cima y las válvulas de entrada y salida de agua de enfriamiento. Asimismo, abrir la válvula de paso a uno de los tanques colectores de cima y regular el flujo de reflujo verificando que el nivel en el tanque de acumulación de reflujo se mantenga estable. Finalmente se debe abrir el paso de producto de fondos hacia el enfriador de fondos y la válvula de entrada a uno de los colectores de fondos para tomar las muestras deseadas empleando las válvulas de toma de muestras.

**Figura 26.** Operación de la columna de destilación extractiva



**Nota:** En la figura se puede observar el modo de operación de la columna de destilación extractiva. Tomado de [PSE, “Manual de operación Planta de destilación continua,” vol. 01. 2018.]

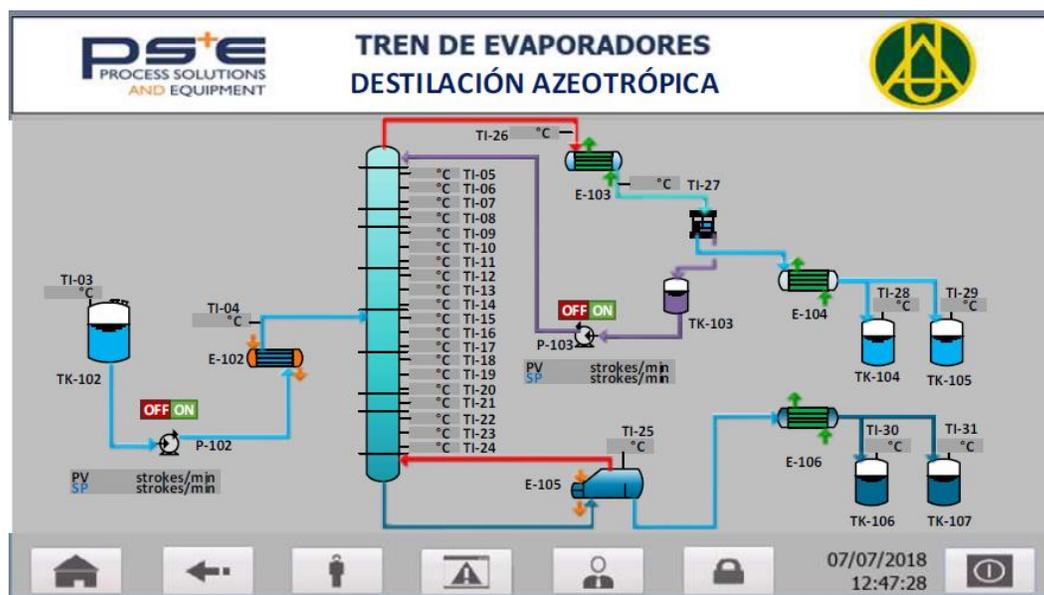
#### - Destilación azeotrópica

Según el manual de operaciones de PSE, en primer lugar se debe permitir el paso de alimento hacia el rotámetro abriendo la válvula que conecta el tanque a la bomba y las válvulas de entrada y salida del rotámetro, además de verificar que la válvula de alimentación al rehervidor se encuentra cerrada. Después se debe abrir la válvula de entrada de alimento al precalentador y la válvula de salida del precalentador. Posteriormente, seleccionar el punto de alimentación que se desea utilizar y abrir la válvula correspondiente. Así, abrir el rotámetro de alimentación para permitir el flujo hacia el precalentador. Encender la bomba

de alimentación y fijar el flujo de alimentación y regular el flujo de reflujo. A continuación, abrir la válvula de salida de condensado del precalentador y la válvula de entrada de vapor al precalentador, después permitir el paso de la fase orgánica a los tanques colectores de cima y abrir las válvulas de entrada y salida de agua de enfriamiento del enfriador de cima. Abrir la válvula de paso a uno de los tanques colectores de cima y permitir el paso de la fase acuosa al tanque de reflujo.

Asimismo, se debe regular el flujo de reflujo y monitorear que el nivel del tanque de reflujo se mantenga estable. Finalmente se debe abrir el paso de producto de fondos hacia el enfriador de fondos y abrir la válvula de entrada a uno de los colectores de fondos para después, tomar las muestras deseadas usando las válvulas de toma de muestras.

**Figura 27.** Operación de la columna de destilación azeotrópica



**Nota:** En la figura se puede observar el modo de operación de la columna de destilación azeotrópica.

Tomado de [PSE, “Manual de operación Planta de destilación continua,” vol. 01. 2018.]

2.1.1.c Normas de seguridad relacionadas a la columna de destilación. Para hacer uso de la columna de destilación se deben tener en cuenta las siguientes normas y recomendaciones [27]:

- Elementos de protección personal: Las personas que ingresen a la planta piloto y operen el sistema debe contar con gafas de seguridad, casco, bata de laboratorio y guantes de carnaza o resistentes al calor.

- Equipos de alta presión: Es importante realizar el mantenimiento de los dispositivos de alivio de presión, ya que permiten minimizar los daños si los equipos operan presiones mayores a las permitidas. Además, estos recipientes no deben tener agujeros, cortes o soldaduras por personal sin calificación.
- Equipos a alta temperatura: Las altas temperatura pueden representar un riesgo de seguridad para el personal, debido a que la piel tolera temperaturas hasta de 40°C y por encima de esta se producen afectaciones y se altera la capacidad de reparación celular. [27]. Por lo tanto, se debe utilizar protección personal que permita evitar quemaduras o lesiones de grado mayor.
- Operar el equipo en una zona con ventilación adecuada por cuanto puede haber acumulación de vapores de solventes. De lo contrario se pueden generar atmosferas inflamables o asfixiantes.
- No separarse de las unidades de proceso por tiempo prolongado. Si es necesario
- ausentarse, avisar al relevo.
- Evitar el acceso al panel interno de las cajas eléctricas.
- Garantizar el flujo constante de agua fría. Si durante el proceso se interrumpe la admisión de agua fría se debe suspender inmediatamente la operación y detener el flujo de vapor.
- Dejar los equipos limpios y lavados después de la operación evitando la corrosión y la
- contaminación cruzada entre lotes de procesamiento.
- Si se presentan escapes o fugas remediarlas cuando sea posible con las herramientas disponibles. Si la magnitud de la fuga es grande detener la operación.
- Almacenar el solvente concentrado fuera de los colectores para evitar contaminación cruzada entre solventes. Usar envases de material inerte para evitar su desnaturalización.
- Realizar mantenimiento preventivo y correctivo de la unidad de proceso. Limpiar frecuentemente el equipo por acumulación de polvo o materiales extraños. Mantener limpia y aseada el área de operación, y el tablero de control.

2.1.1.d Peligros relacionados. Los peligros relacionados a la columna de destilación se encuentran expuestos en el anexo 1, que corresponde al What If realizado para el centro de proceso de la Universidad de América.

### **2.1.2 Columna de absorción**

El proceso de absorción de gases se centra en la remoción de uno o más componentes de una corriente de gas, dándose una purificación o separación al ser absorbidos por un solvente. Es una operación unitaria de transferencia de materia que consiste en poner en contacto un gas con un líquido, para que este se disuelva determinados componentes del gas, dejándolo libre de los mismos. Esta puede ser física o química, según que el gas se disuelva en el líquido absorbente o reaccione con él dando un nuevo compuesto químico [29].

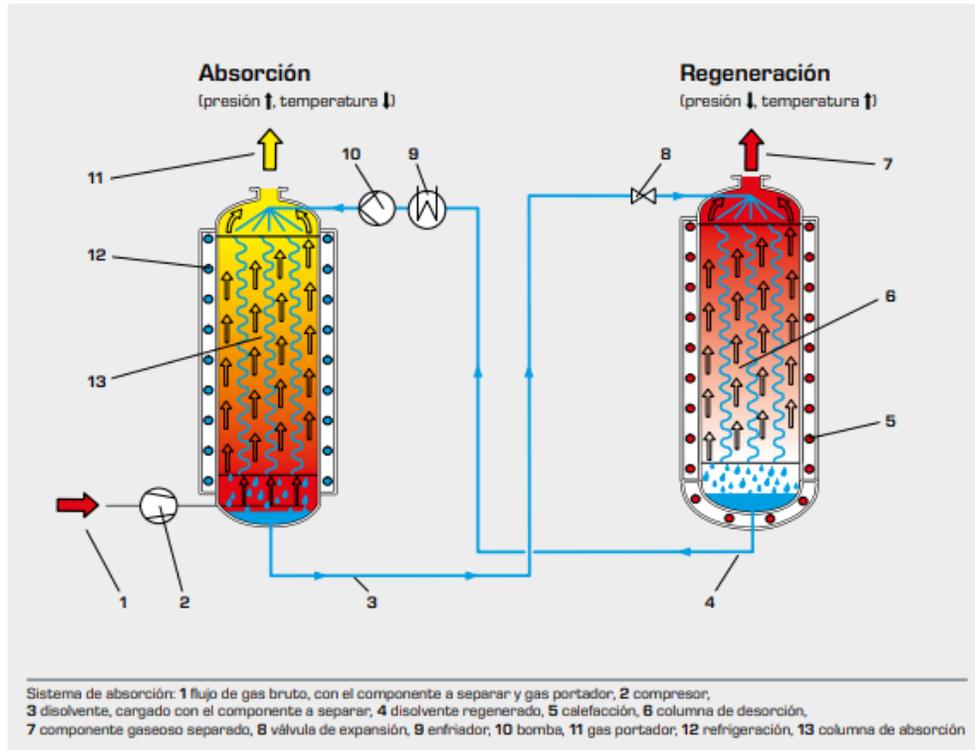
La absorción se emplea en la industria para: eliminar un componente gaseoso no deseado de una corriente gaseosa; obtención de un líquido como la producción de ácido clorhídrico por absorción de HCl gaseoso o simplemente la obtención de un componente gaseoso deseado [30]. En la absorción participan por lo menos tres sustancias: el componente gaseoso a separar (adsorbato), el gas portador y el disolvente (absorbente).

La relación que existe entre las moles del componente (i) en la fase líquida respecto a las presentes en la fase gaseosa a las condiciones de equilibrio del sistema se asocia al componente de distribución o coeficiente de reparto ( $K_i$ ). Para un componente gaseoso altamente soluble en un solvente, el coeficiente de distribución es grande. Mientras que un coeficiente de distribución pequeño indica la tendencia de un compuesto a permanecer en la fase gaseosa [31].

El solvente empleado en la operación de absorción debe ser insoluble con uno de los componentes de la corriente rica en compuestos gaseosos, esto permitirá una buena eficiencia de separación. La columna de absorción generalmente opera a presiones por encima de la atmosférica y a temperaturas bajas, esto debido a que a mayor presión la solubilidad del gas en el líquido aumenta y a temperaturas bajas se impide la vaporización del solvente empleado en la operación. En la figura 27 se muestra el proceso de absorción de una corriente gaseosa

con un solvente compatible (izquierda) y la recuperación del solvente mediante un proceso de desorción (derecha).

**Figura 28.** Operación básica de una columna de absorción y desorción



**Nota:** En la figura se observa una esquematización básica del proceso de absorción y desorción de una corriente gaseosa. Tomado de [Gunt Hamburg, “Ingeniería de procesos térmicos-Absorción y adsorción.” Accessed: Apr. 06, 2022. [Online]. Available: [https://www.gunt.de/images/download/absorption\\_spanish.pdf](https://www.gunt.de/images/download/absorption_spanish.pdf)]

2.1.2.a Diseño de la columna de absorción. Process Solutions and Equipment (PSE) ha desarrollado un prototipo experimental robusto para estudiar el desempeño de operaciones de absorción, permitiendo manipular y controlar las variables de operación principales del proceso: tipo de solvente, tipo de gas, flujos y temperaturas de alimentación, relación gas-líquido [31]. Esto para contribuir con la serie de equipos que harán parte del CEPURE en el Centro de procesos de ingeniería de la Universidad América.

La unidad está compuesta por el sistema de generación de aire, de humidificación, la columna de absorción, los tanques de acumulación del solvente, y el tablero de control. El equipo es robusto, durable, construido en acero inoxidable 304 con acabado brillante [31]. Este equipo

puede ser destinado en diversas aplicaciones de absorción de gases tales como: absorción de CO<sub>2</sub> con solución alcalina o con aminas, compuestos orgánicos volátiles con aceite lubricante, aire contaminado con gases ácidos o alcalinos con agua, absorción con líquidos iónicos, entre otros.

El sistema de generación de aire consta de un compresor de gas sintético que trabaja a una presión mínima de 2 bar, y un flujo de 20 L/min; compuesto de un filtro para remover partículas sólidas y aceites lubricantes, líneas de desagüe para remover purgas de agua, manómetros para verificar la presión y un regulador de flujo a la entrada de la línea de aire.

La columna humidificadora posee un diámetro de 3 pulgadas y una altura de 60 cm, cuenta con un sistema de automatización de agua para garantizar una saturación completa, conexiones de entrada y salida de gas y líquido. También cuenta con un ciclón ubicado a la salida del gas de entrada el cual tiene el objetivo de evitar gotas de arrastre y/o entradas de gotas de agua a la columna de absorción. La principal aplicación de la humidificación es el enfriamiento de agua de refrigeración sin la presencia de una fuente de calor externa.

La columna de absorción cuenta con una altura total de 2m y uniones tipo “clamp” que le permiten un montaje y desmontaje más rápido. Cada sección dentro de la columna se encuentra llena de empaques al azar (de material inerte), que por sus distintas geometrías permiten una mayor interacción gas-líquido. Por otra parte, cuenta con sensores termocupla tipo J que permiten obtener un perfil de temperaturas a lo largo de la columna y dos sensores de presión para medir la caída de presión [31], estos sensores están interconectados al tablero de control lo cual proporciona facilidad en cuanto a la visualización.

Entre las dos secciones principales de la columna se encuentra el soporte de empaque y el redistribuidor de líquido para evitar canalización en las paredes. En la parte baja de la columna se cuenta con una entrada y salida de vapor, con válvulas destinadas para la descarga y purga de la columna. La parte superior tiene una salida en tubería para venteo de aire seco y una válvula de control para la entrada de solvente.

El sistema en general permite una regulación manual de los flujos de gas y de solvente, por medio del uso de válvulas de aguja o globo, y rotámetros previamente calibrados. Los sensores de presión tienen alta precisión operando en un rango de 0 a 4 bar. La concentración

se establece por análisis rápido usando refractómetro. Adicionalmente se cuenta con sensores de humedad relativa en la línea de alimentación y descarga del aire [31]. Es necesario resaltar que la información arrojada por los sensores se encontrará localizada en el tablero de control.

El sistema de almacenamiento de solvente fresco se da en un tanque cilíndrico de acero inoxidable, con capacidad de almacenar 50L [31]. Conectado a una bomba centrífuga para la alimentación y recirculación. Posee tapa removible para llenado, válvula de retorno tipo bola, purga inferior en línea con válvula de bola y línea de descarga con válvula de bola hacia el sistema de bombeo para alimentar la columna.

Otro de los sistemas de almacenamiento con los que cuenta el equipo de absorción es el tanque de almacenamiento y de generación de solvente gastado, con capacidad de 50L, el cual posee una chaqueta de calentamiento. En general el tanque cuenta con un arreglo de válvulas de nivel visible, purga inferior en línea con válvula de bola y una tapa flanchada removible. Sobre esta tapa se sitúa una válvula de bola de ¼ de pulgada en acero inoxidable para alivio atmosférico, una línea de entrada y acople a línea de vacío con válvula de bola. El tanque se encuentra aislado con fibra de vidrio con el propósito de reducir pérdida en la transferencia de calor.

El sistema de vacío este compuesto por una bomba de diafragma con capacidad para remover 13 L/min y una presión mínima de 0.1 bar. En la sección superior de la bomba de vacío se encuentra una trampa de vacío para remoción de gases condensables y protección de la bomba de vacío. La trampa de vacío es un tanque cilíndrico en acero inoxidable con serpentín interno de ½ de pulgada. El tanque se carga con hielo y agua, que actúa como medio de enfriamiento para los gases condensables. La espiral y el tanque cuentan con purga inferior en línea con válvula de bola. Ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable.

Por último, el equipo cuenta con un tablero de control de manejo remoto, en donde se visualizan los indicadores de temperatura, las bombas de solvente y agua, indicadores de presión e higrómetro (medidor de humedad del aire), un selector de termopares, 4 botones (energización del sistema, encendido de sistema de termopares, encendido bomba de solvente fresco, encendido bomba de recirculación de solvente gastado), 4 bombillos testigo (encendido de las 2 bombas, corriente de la caja eléctrica, corriente de sensores) y una parada de emergencia.

**Figura 29.**

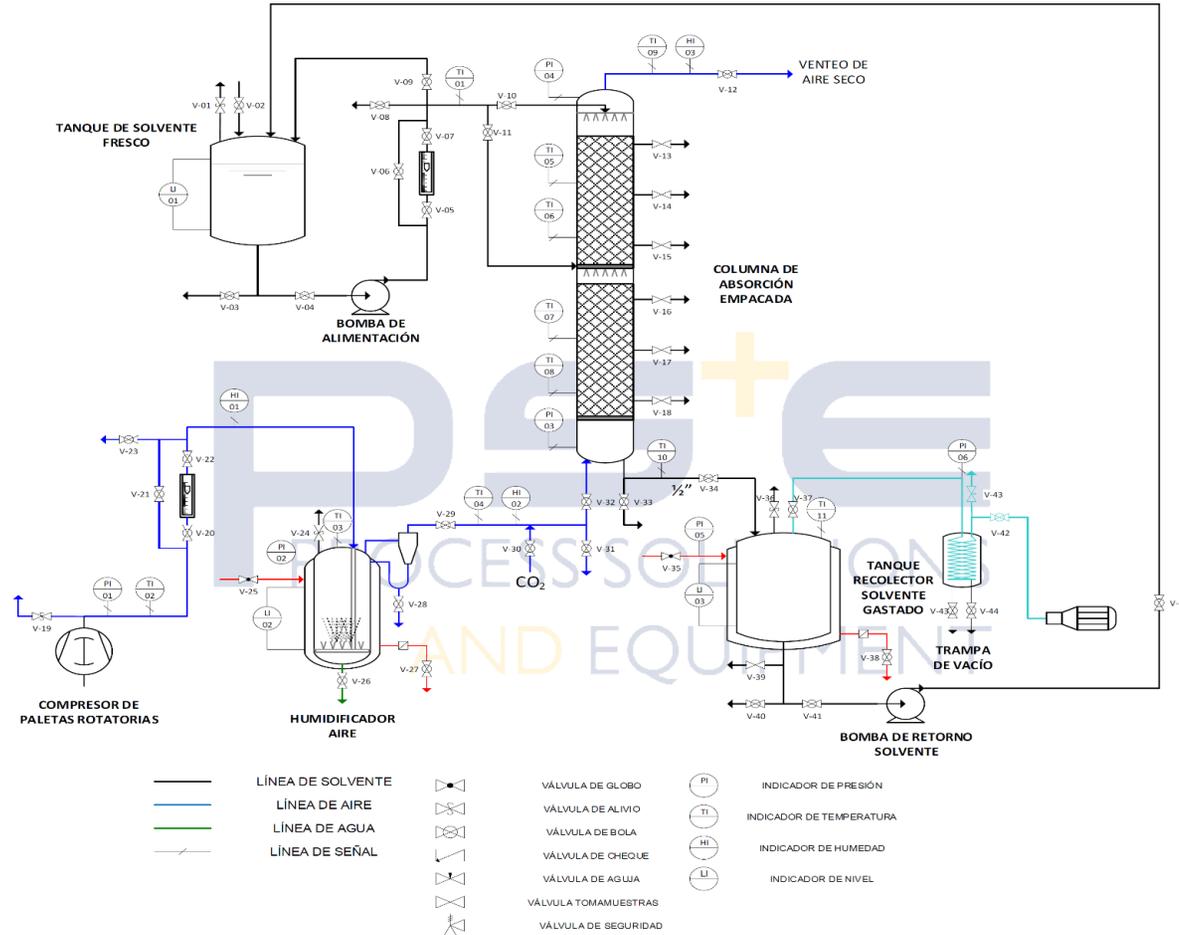
*Columna de absorción del Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE)*



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

**Figura 30.**

*Diagrama columna de absorción del Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE)*



**Nota:** En la figura se evidencia un diagrama P&ID de la columna de absorción del Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE). Tomado de [PSE, “MANUAL DE OPERACIÓN PLANTA DE ABSORCIÓN,” 2018]

Es importante considerar el uso de sustancias químicas que sean compatibles con los materiales de construcción de los equipos y accesorios. Para ello se debe tener en cuenta que para la columna de absorción la sustancia debe ser compatible con acero inoxidable 304 (SS 304) y simultáneamente con teflón (PTFE), Viton y EPDM, como se observa en el anexo 2.

2.1.2.b Operación de la columna de absorción. Según el manual elaborado por PSE para el diseño y operación de la columna de absorción es necesario realizar una adecuación previa del sistema antes de realizar el arranque, por lo tanto, se resalta que, si el sistema fue utilizado con un material diferente al que se va a procesar, se debe llenar el sistema con el nuevo solvente a emplear y evaporar este solvente antes de la nueva extracción. También es necesario purgar los tanques y válvulas, ya que puede haber rastros de material de corridas anteriores y aún tras el lavado puede haber escurrimiento del material residual en las paredes.

Se debe verificar que las válvulas de purga del tanque de solvente fresco, columna de absorción y tanque recolector del solvente gastado, se encuentren limpias y sin bloqueos, posteriormente se debe presenciar que están cerradas para evitar descargas no controladas. También, se deben verificar que las válvulas de alivio del tanque de solvente fresco, el humidificador de aire y el tanque recolector del solvente gastado se encuentren cerradas, del mismo modo verificar que los medidores de nivel estén abiertos en estos equipos.

Una vez realizados los protocolos expuestos anteriormente el arranque del proceso empieza con la carga del tanque de alimentación de solvente fresco por medio de la válvula de alimentación. La capacidad neta del tanque es de 50 L, y este se debe llenar máximo en un 80% [31]. La carga del solvente se realiza de forma lenta para evitar cualquier tipo de derrame. Se deben abrir las válvulas de succión y descarga de la bomba de alimentación y la válvula de recirculación de solvente.

La bomba de alimentación de solvente se debe activar desde el tablero de control una vez se haya verificado que las válvulas que dan paso al solvente hacia la columna, la válvula de calibración del rotámetro y la válvula del by-pass del rotámetro se encuentren totalmente cerradas.

Para el sistema de humidificación del aire se debe cargar con el compuesto que será absorbido; para la carga se dispone de dos válvulas independiente, la primera para cuando el

compuesto es agud de servicio y la segunda si se emplea un compuesto diferente. El tanque se debe llenar un 80% de la capacidad máxima del tanque (50L). Antes de proceder con la carga lenta se debe cerrar la válvula de desagüe y abrir la válvula de alivio.

Verificar que la válvula que da paso al aire húmedo hacia la columna de absorción esté completamente cerrada y que la válvula de purga de aire húmedo esté completamente abierta, la válvula de calibración del rotámetro y la válvula del by-pass del rotámetro del aire deben estar completamente cerradas. Abrir la válvula de salida de aire de compresor, la válvula reguladora de presión, la válvula de control y las válvulas que dan paso al aire por el rotámetro.

La válvula de entrada y la válvula de salida de aire del sistema de humidificación deben estar completamente abiertas. Tras realizar la verificación de lo mencionado encender el compresor. Lugo abrir la válvula de entrada de vapor vivo a la chaqueta de calentamiento del humidificador y la válvula de salida de condensados de la chaqueta. Es importante mantener estas condiciones hasta que la medición registrada por el higrómetro en la corriente de aire húmedo permanezca constante.

Para la puesta en marcha de la columna de absorción se debe abrir completamente la válvula de salida del solvente húmedo, verificar que la válvula de purga al igual que las válvulas de toma de muestras se encuentren completamente cerradas, una vez realizada la validación se deben abrir completamente las válvulas que dan paso del solvente hacia la columna de absorción. La válvula de recirculación de solvente debe estar cerrada. Se debe dar apertura lenta a las válvulas de venteo de aire seco y de entrada de aire húmedo respectivamente. Cerrar completamente la válvula de purga de aire seco y permitir que el sistema se estabilice en un lapso de 30 min.

Una vez transcurrida la estabilización de la columna, se debe realizar un seguimiento al proceso mediante la toma de muestras de la columna, el registro del caudal de aire, solvente y la presión de la columna en intervalos de tiempo específicos.

Para realizar la recuperación del solvente se debe tener en cuenta el siguiente protocolo. Cerrar completamente la válvula de salida de solvente húmedo y la válvula de alivio del tanque de solvente gastado. Verificar que la válvula de purga, de tomas de muestras, de

descarga y succión de la bomba de retorno de solvente estén completamente cerradas. La válvula de salida de condensados de la chaqueta del tanque de solvente gastado debe estar abierta. Posterior a ello llenara la trampa de vacío con hielo.

Abrir la válvula que conecta el tanque de solvente gastado con la trampa de vacío y la válvula de entrada del vapor vivo a la chaqueta del tanque de solvente gastado. Abrir la válvula que conecta la trampa con la bomba de vacío. Encender la bomba de vacío. Mantener la operación en estas condiciones hasta alcanzar la pureza de solvente deseada.

Una vez lograda la pureza deseada apagar la bomba de vacío. Cerrar la válvula de entrada del vapor vivo a la chaqueta del tanque de solvente gastado. Verificar que la válvula de descarga del tanque de solvente fresco y la válvula de succión de la bomba de alimentación se encuentran cerradas. Abrir lentamente la válvula de alivio del tanque de solvente gastado, la válvula de alivio del tanque de solvente fresco y la válvula de descarga y succión de la bomba de retorno de solvente. Encender la bomba de retorno de solvente. Permitir que el tanque de solvente fresco se llene máximo hasta el 80% de su capacidad.

Las operaciones de limpieza, parada y mantenimiento se describen de forma detallada en el manual de operación del equipo propuesto por PSE disponible en el Centro de procesos de ingeniería de la universidad de América, en el cual se disponen todos los protocolos necesarios a tener en cuenta en la operación y manejo del equipo, por tal razón es de suma importancia tener conocimiento total antes de operar el equipo.

2.1.2.c Normas de seguridad relacionadas a la columna de absorción. Para hacer uso de la columna de absorción se deben tener en cuenta las siguientes normas y recomendaciones [31]:

- Elementos de protección personal: Las personas que ingresen a la planta piloto y operen el sistema debe contar con gafas de seguridad, casco, bata de laboratorio y guantes de carnaza o resistentes al calor.
- Sustancias permitidas: Se debe verificar la compatibilidad química de las sustancias a utilizar con el acero SS304 y teflón (PTFE).

- Operar el proceso con mínimo dos personas para evitar accidentes, y respaldar y/o relevar en las actividades del proceso. Informar a la persona responsable el inicio y parada de operación en la planta.
- Operar el equipo en una zona con ventilación adecuada para evitar acumulación de vapores de solventes. De lo contrario se pueden generar atmosferas inflamables o asfixiantes.
- Mantener en un lugar accesible un botiquín de primeros auxilios y un extintor de fuego.
- No separarse de las unidades de proceso por tiempo prolongado. Si es necesario ausentarse, avisar al relevo.
- Las personas que operan el equipo no deben trabajar más de 8 horas continuas sin descanso, el cansancio puede propiciar accidentes graves.
- Evitar el acceso al panel interno de las cajas eléctricas.
- Nunca descargar el sistema en caliente. Dejar que el equipo se enfríe hasta una temperatura de 25°C para descargarlo (esto puede tardar varias horas por que el sistema está aislado térmicamente). Prevenga accidentes.
- Dejar los equipos limpios y lavados después de la operación evitando la corrosión y la contaminación cruzada entre lotes de procesamiento, para así evitar peligros y alargar la vida útil del equipo.
- Para descargar el tanque siempre utilizar overol, guantes de carnaza y si es posible una pechera del mismo material para evitar quemaduras si el material aún está caliente
- Almacenar el solvente concentrado fuera de los colectores para evitar contaminación cruzada entre solventes. Usar envases de material inerte para evitar su desnaturalización.
- Realizar mantenimiento preventivo y correctivo de la unidad de proceso. Ajustar las tuberías que presenten fugas o goteos, cambiar el empaque que sella entre el tanque y la tapa cuando se requiera, limpiar frecuentemente los equipos por acumulación de polvo o materiales extraños. Mantener limpia y aseada el área de operación, y el tablero de control.

- Si se presentan escapes o fugas remediarlas cuando sea posible con las herramientas disponibles. Si la magnitud de la fuga es grande detener la operación y dejar enfriar para poder resolver el problema con seguridad.
- No permita que entre líquido a la bomba de vacío.

2.1.2.d Peligros relacionados. Los peligros relacionados a la columna de absorción se encuentran expuestos en el anexo 1, que corresponde al What If realizado para el centro de proceso de la Universidad de América.

### **2.1.3 Secador de bandejas SB-500**

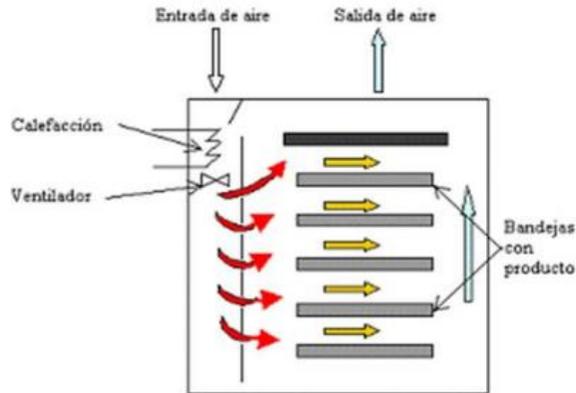
El secado es una operación de transferencia de masa, en donde la humedad que se encuentra presente en el sólido se transfiere por medio de la evaporación hacia la fase gaseosa, debido a la diferencia entre la presión de vapor generada por el sólido húmedo y la presión parcial de vapor de la corriente gaseosa [32]. Debido a esto, cuando las dos presiones tienen el mismo valor, se dice que el sólido y el gas están en equilibrio y por lo tanto el proceso de secado termina.

El calor que se requiere en el proceso de secado se puede proveer de forma convectiva, por conducción, por radiación o por campos electromagnéticos [33] Cabe destacar que en la mayoría de los secadores industriales el compuesto a remover es agua, por lo que se utiliza la convección empleando aire caliente o gases de combustión como medios de calentamiento para realizar la evaporación.

La eficiencia del proceso de secado dependerá considerablemente de la forma de enlace de la humedad con el material, puesto que cuanto más sólido es el enlace, será más difícil y demorado el secado.

**Figura 31.**

*Ilustración de un secador de bandejas*



**Nota:** En la figura se puede observar el modo de operación de un secador de bandejas. Tomado de [Eloy Galvez Condori, “Diseño de una secadora de quinua en el departamento de la Paz - Bolivia,” La paz - Bolivia, 2016]

2.1.3.a Diseño del secador de bandejas. Según el manual de operación dispuesto por Process Solutions and Equipment (PSE), la unidad está compuesta por una cámara de secado que contiene un sistema de bandejas de acero Inox 304, un ventilador de velocidad variable, un sistema de adecuación de humedad del aire, resistencias para el calentamiento del aire, celdas de carga y un sistema de ductos para la recirculación del aire.

El ventilador es capaz de proveer 500 pies cúbicos de aire por minuto con una presión estática de 1 pulgada de columna de agua [33]. Además, cuenta con un variador de velocidad para controlar el flujo de aire secado. Por otro lado, el sistema que toma el aire cuenta con un filtro para evitar la contaminación por partículas y microorganismos.

Para el sistema de adecuación de humedad, el equipo contiene un reservorio de agua que se encuentra ubicado previo a las resistencias de calentamiento. Este reservorio alimenta una bomba que transporta el agua a un sistema de aspersión. Los aspersores permiten controlar la humedad del aire de entrada al proceso de secado [33].

En el sistema de calentamiento, el aire es aumentado su temperatura utilizando un sistema de resistencias que pueden proveer una potencia máxima de 6.75 KW, estas resistencias están

ubicadas a la salida del ventilador y cuentan con un regulador que permite controlar la temperatura del aire de alimentación.

Por otro lado, la cámara de secado cuenta con una puerta frontal con un vidrio para el seguimiento del proceso y al interior del secador se observa un sistema de 3 bandejas cuadradas removibles. Estas bandejas están construidas en malla tejida de acero inoxidable [33]. En el interior de la cámara de secado se encuentra un sensor de temperatura.

El secador cuenta con ductos de aire en las paredes de la cámara superiores, inferiores y laterales, además de un sensor de temperatura y humedad (para el aire ambiente, el flujo de aire de alimentación y el aire de salida de la cámara).

Finalmente, el equipo cuenta con un tablero de control que incorpora todos los componentes eléctricos y electrónicos de la unidad, entre los que se encuentran el PLC, relés, fusibles, variadores de frecuencia, así como todos los elementos de control [33].

**Figura 32.**

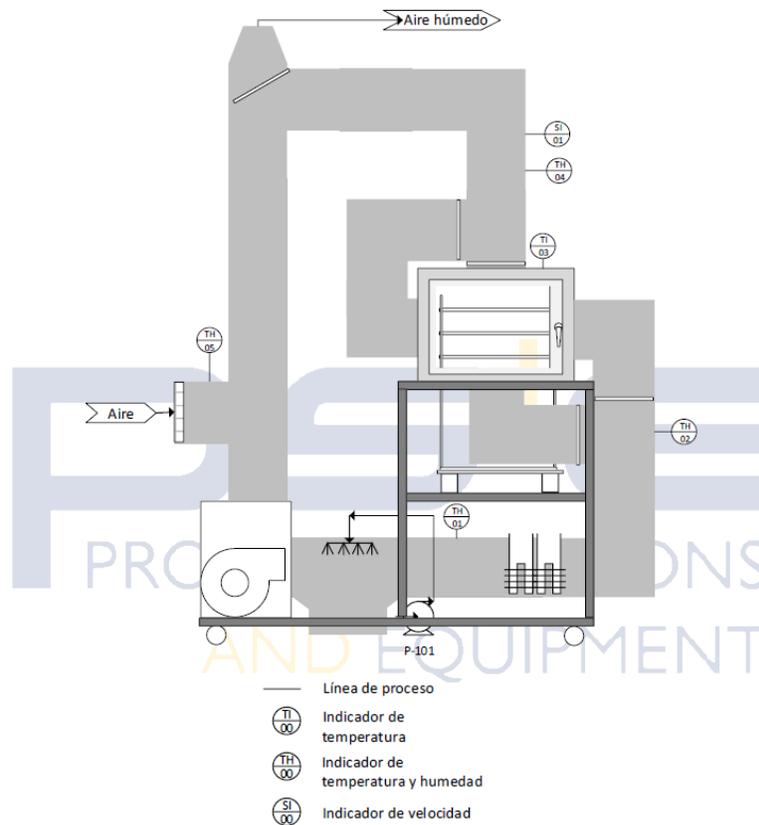
*Secador de bandejas del Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE)*



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

**Figura 33.**

*Diagrama secador de bandejas del Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE)*



**Nota:** En la figura se evidencia la estructura del secador de bandejas del Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE). Tomado de [PSE, “MANUAL DE OPERACIÓN SECADOR DE BANDEJAS,” 2018]

Es importante considerar el uso de sustancias químicas que sean compatibles con los materiales de construcción de los equipos y accesorios. Para ello se debe tener en cuenta que para el secador de bandejas la sustancia debe ser compatible con acero inoxidable 304 (SS 304) y simultáneamente con teflón (PTFE), Viton y EPDM, como se observa en el anexo 2.

2.1.3.c Operación del secador de bandejas. Según el manual de operaciones de PSE en primer lugar se debe encender el equipo, el ventilador y la bomba de agua si se va a acondicionar el aire. Posteriormente se debe ajustar el flujo de aire con el variador del ventilador y regular la humedad del aire a la entrada mediante la regulación del flujo de agua.

Se debe especificar la temperatura del bulbo seco del aire y encender las resistencias para permitir el control automático de la temperatura del aire de alimentación al secador. Es necesario que el equipo se estabilice durante 30 minutos y después se debe depositar el sólido sobre las bandejas para ubicarlas en el soporte dentro de la cámara de secado.

Luego, se cierran las puertas del secador y se verifica que no queden en contacto con las bandejas. Finalmente, se toma el peso inicial del sólido y los datos de temperatura, humedad, velocidad de aire y peso del sólido a intervalos definidos de tiempo hasta llegar a la humedad requerida.

2.1.3.d Normas de seguridad relacionadas al secador de bandejas. Para hacer uso del secador de bandejas se deben tener en cuenta las siguientes normas y recomendaciones [33]:

- Elementos de protección personal: Las personas que ingresen a la planta piloto y operen el sistema debe contar con gafas de seguridad, casco, bata de laboratorio y guantes de carnaza o resistentes al calor.
- Seguridad de eléctrica: Solamente un electricista calificado puede realizar mantenimiento y reparación de los sistemas eléctricos, debido a que toda la distribución de potencia, paneles de control e instrumentos operan con una carga eléctrica que puede lesionar al personal. Si existe una sobrecarga, se debe determinar su causa y solucionar antes de seguir con el proceso.
- Equipos a alta temperatura: Las altas temperatura pueden representar un riesgo de seguridad para el personal. Por lo tanto, se debe utilizar protección personal que permita evitar quemaduras o lesiones de grado mayor.
- Operar el equipo en una zona con ventilación adecuada para evitar acumulación de vapores de solventes. De lo contrario se pueden generar atmosferas inflamables o asfixiantes.
- No separarse de las unidades de proceso por tiempo prolongado. Si es necesario ausentarse, avisar al relevo.
- Las personas que operan el equipo no deben trabajar más de 8 horas continuas sin descanso, el cansancio puede propiciar accidentes graves.

- Evitar el acceso al panel interno de las cajas eléctricas.
- No exceder los límites establecidos para las variables de operación.
- Desocupar el reservorio de agua si el equipo no se va a emplear durante un periodo prolongado.
  - Dejar los equipos limpios después de la operación evitando la corrosión y la contaminación cruzada entre lotes de procesamiento.
  - Para descargar el tanque siempre utilizar overol, guantes de carnaza y si es posible una pechera del mismo material para evitar quemaduras si el material aún está caliente
  - Realizar mantenimiento preventivo y correctivo de la unidad de proceso. Mantener limpia y aseada el área de operación, y el tablero de control.

2.1.3.e Peligros relacionados. Los peligros relacionados al secador de bandejas se encuentran expuestos en el anexo 1, que corresponde al What If realizado para el centro de proceso de la Universidad de América.

#### **2.1.4 *Extractor sólido-líquido y líquido-líquido***

- Extractor sólido-líquido

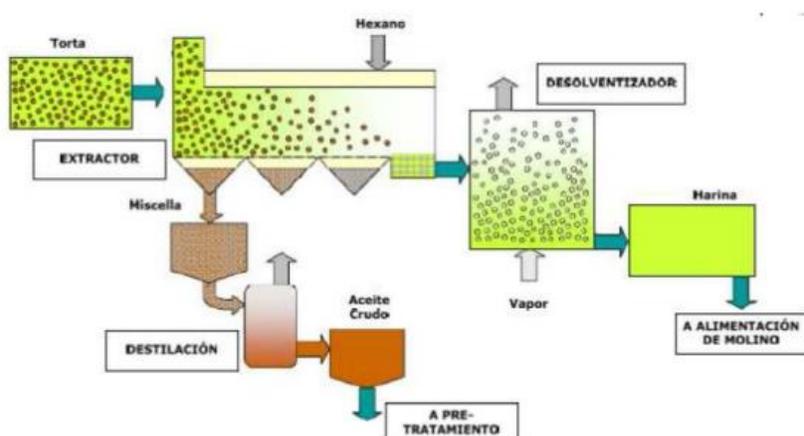
El proceso de extracción sólido-líquido es una operación básica de recuperación o extracción mediante la cual uno o varios componentes de una fase sólida desestructurada, denominada alimento, se transfiere a una fase líquida, disolvente [35]. Esta transferencia se da gracias a la diferencia de concentraciones entre el soluto y el solvente. Como consecuencia de la alta concentración del soluto el solvente se impregna en el material poroso haciendo que por difusividad se disuelva en el solvente.

El rendimiento y eficiencia de la extracción depende de diversas variables tales como: naturaleza, tamaño y forma de las partículas sólidas, la concentración del soluto en el sólido, la compatibilidad entre soluto-solvente, la relación másica sólido-solvente, las propiedades del solvente, la temperatura, la presión, el pH, el régimen de mezclado, el tiempo de residencia, entre otras [36].

Por el efecto de las variables y por la disminución en costos de operación, industrialmente se prefiere trabajar a condiciones normales (percolación). En este tipo de extracción se cuenta con un equipo llamado percolador. Al cual se le suministra el fluido de extracción de forma continua a un lecho estático de sólido durante determinado tiempo de residencia. Una vez finalizada la extracción la corriente líquida resultante se filtra y se lleva a un proceso de evaporación que busca concentrar el soluto, como también remover y recuperar el solvente empleado en la extracción. El fundamento de la extracción sólido-líquido expuesto anteriormente se puede apreciar en el proceso de obtención de aceite crudo (figura 27) empleando hexano como solvente de extracción.

**Figura 34.**

*Extracción sólido-líquido en el proceso de obtención de aceite crudo de palma*



**Nota:** En la figura se evidencia el proceso de extracción sólido-líquido para la obtención de aceite crudo de palma empleando hexano como solvente. Tomado de [Gómez Marisa Fito Pedro Seguí Lucía Betoret Noelia, Fundamentos de la Extracción Sólido-Líquido]

Con base en lo anterior, PSE ha desarrollado un prototipo experimental robusto para estudiar el desempeño de operaciones de extracción sólido-líquido utilizando el principio de percolación emulando el funcionamiento de un Soxhlet. El equipo permite manipular y controlar las variables principales del proceso: tamaño de partícula del sólido, tipo de solvente, nivel de agitación, temperatura de extracción, relación sólido-solvente, tipo de operación, presión en la etapa de concentración, velocidad de agitación, entre otras [36].

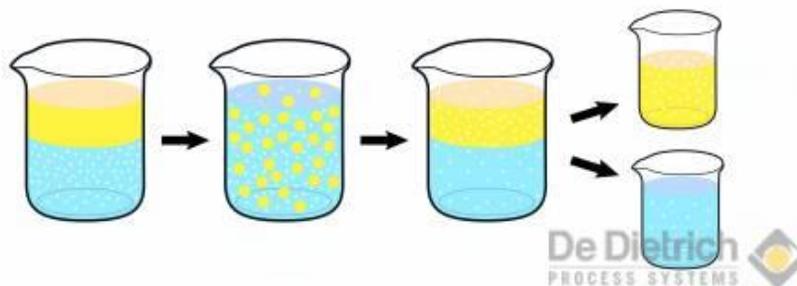
## - Extractor líquido-líquido

Esta operación unitaria se centra en la extracción de un soluto desde una fase líquida mediante un solvente de extracción que tenga una alta afinidad selectiva con el soluto. El análisis de la extracción con solventes se realiza mediante el uso de diagramas ternarios (soluto, solvente 1 y solvente 2).

El primer paso de un proceso de extracción es el mezclado con el fin de crear un contacto intenso de las dos fases líquidas que permita la transferencia de masa del producto (puntos blancos) desde el licor (azul) de alimentación al disolvente (amarillo). El segundo paso es la separación de fases o la decantación de las 2 fases líquidas. Tras la extracción del producto, el licor de alimentación se denomina refinado (líquido azul con menos puntos blancos), mientras que el disolvente que contiene el producto se denomina extracto (líquido amarillo con puntos blancos) [37]. Para la recuperación del producto, el disolvente ha de separarse del producto en un tercer paso subsiguiente que se realiza generalmente por evaporación.

**Figura 35.**

*Extracción líquido-líquido*



**Nota:** En la figura se evidencia el proceso de extracción líquido. Tomado de [“Extracción líquido/líquido | De Dietrich Process Systems.” <https://www.dedietrich.com/es/soluciones-y-productos/extraccion/extraccion-liquido/liquido> (accessed Jun. 09, 2022)]

La unidad PESL desarrollada por PS+E permite llevar a cabo procesos de extracción líquido-líquido. El percolador funciona como mezclador – sedimentador y la operación se puede realizar a diferentes velocidades de agitación y diferentes temperaturas [36].

2.1.4.a Diseño del extractor sólido-líquido y líquido-líquido. La planta de extracción diseñada por Process solutions and equipment (PSE) para las dos modalidades de operación,

está compuesta por el sistema de calentamiento, el sistema de extracción, el condensador, el sistema de concentración del extracto, los tanques colectores de solvente, el sistema de vacío, y el tablero de control [36]. Construido en acero inoxidable 304 el equipo permite la operación en continuo y en lotes, este puede ser utilizado para una gran diversidad de aplicaciones de extracción con solventes.

El sistema de calentamiento este compuesto por un tanque calefactor con capacidad de 50 L aislado con fibra de vidrio. El fluido calefactor es aceite térmico de tipo parafínico de alta estabilidad térmica (para ver las características consultar manual), este se hace circular por la chaqueta del extractor o del tanque de concentración de extracto por medio de una bomba centrífuga, la cual aporta un caudal máximo de 19L/min y una altura manométrica de 16m [36].

El tanque percolador está construido con acero inoxidable 304 con capacidad de 20 L aislado con fibra de vidrio. Cuenta con chaqueta de calentamiento donde circula aceite térmico; una tapa con tornillos abatibles, sobre la cual está montada una línea de carga con válvula de bola, una conexión para salida de vapores, una para retorno de solvente, otra para alivio atmosférico con válvula de bola. El tanque cuenta con un sistema de pivote con tres posiciones que facilitan la descarga de sólidos. En la parte inferior del tanque se encuentra, un visor de vidrio y una válvula para toma de muestras.

El sistema de agitación del percolador está constituido por un agitador de cintas helicoidales y un agitador de doble paleta de acero inoxidable. El condensador es un intercambiador de calor de coraza y tubos en acero inoxidable, donde por la coraza circula el fluido refrigerante. Junto a las corrientes de entrada y salida de la corriente de proceso, se dispone de sensores de temperatura, con el fin de verificar si hay una adecuada transferencia de calor. Además, el equipo cuenta con dos válvulas de bola para descarga de condensados.

El visor de condensación está construido con una capacidad de 1L. Posee una conexión superior de alivio y de entrada de fluido del proceso desde el condensador. En la parte inferior tiene conexión de recirculación al percolador, toma de muestras y conexión hacia los tanques colectores [36].

Por otra parte, el sistema de extracción cuenta con un tanque concentrador de acero inoxidable de 20 L, el cual posee una chaqueta de calentamiento por la cual circula aceite térmico; posee una conexión para salida de vapores hacia el condensador, conexión desde el percolador, alivio atmosférico y una conexión para termocupla. En la parte inferior cuenta con purga inferior en línea y válvula para toma de muestras. El concentrador cuenta con un desflemador para prevenir la formación de espuma.

El sistema de almacenamiento de solvente está constituido por una serie de tanques cilíndricos simétricos con capacidad para almacenar 10 L cada uno, fabricados en acero inoxidable. La trampa de vacío está caracterizada por un tanque cilíndrico con serpentín interno empleado como trampa fría para la remoción de gases condensable y protección de la bomba de vacío, cargado con hielo y agua para tal fin. El sistema cuenta con una bomba de diafragma con capacidad para remover 70.3 L/min y una presión mínima de 0.15 bar. La bomba tiene 0.2 hp ,220V ,60 Hz, tensión monofásica [36].

Finalmente, el equipo de extracción cuenta con 5 sensores de temperatura (termocupla tipo K), 2 mano-vacuómetros de tipo bourdon análogos con rango -30 a 2 bar. Los reportes de estos sensores son visualizados en el tablero de control, como también permite la operación, arranque y parada del proceso.

**Figura 36.**

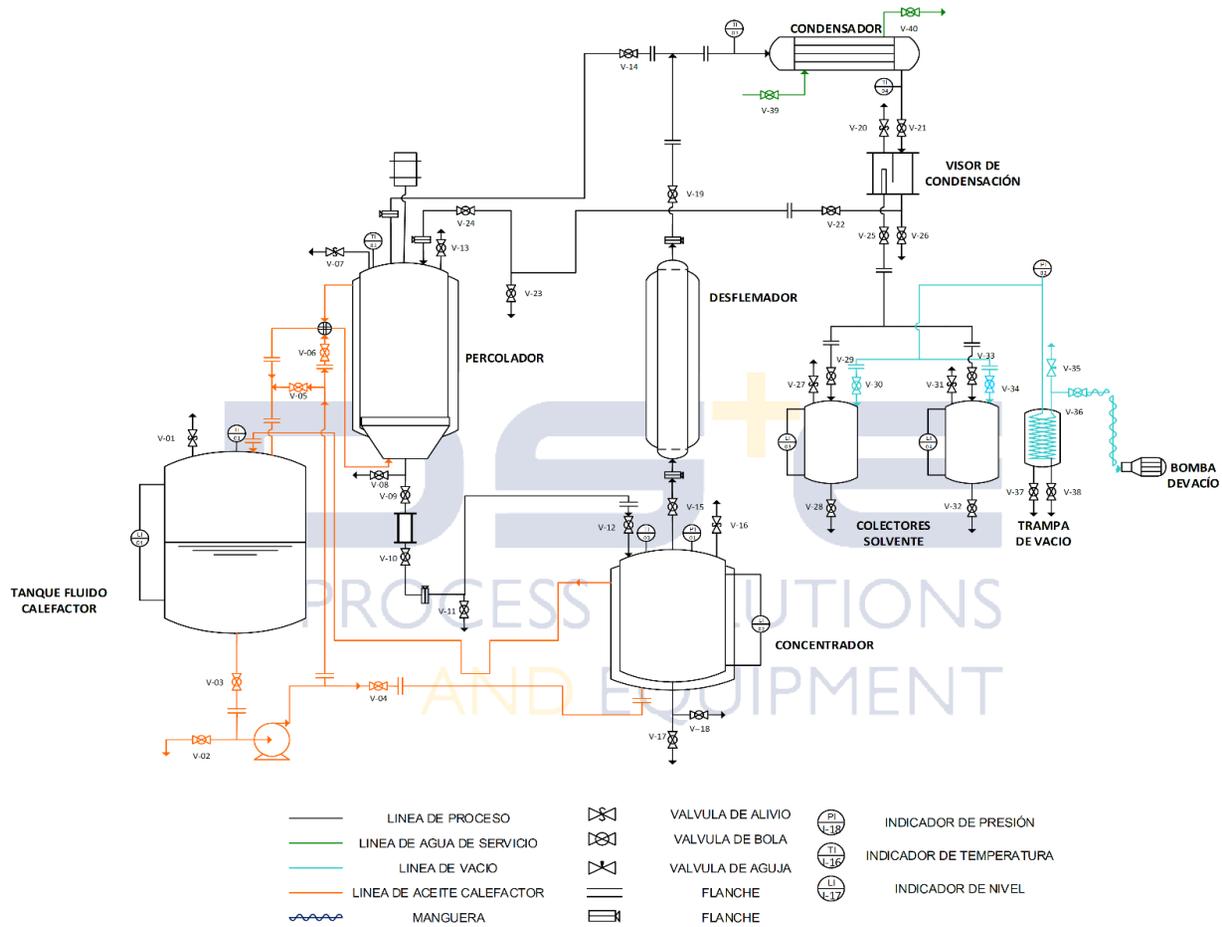
*Extracción líquido-líquido y sólido-líquido del Centro de purificación y refinación de producto*



**Nota:** En la figura se evidencia una fotografía del extractor líquido-líquido y sólido-líquido del Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE). Tomado de [“PRODUCTOS Y SERVICIOS [PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT.” <https://andreaorjuela.wixsite.com/website/productos-y-servicios> (accessed Jun. 06, 2022)]

**Figura 37.**

*Diagrama equipo de Extracción líquido-líquido y sólido-líquido del Centro de purificación y refinación de producto*



**Nota:** En la figura se evidencia un diagrama P&ID Equipo de Extracción líquido-líquido y sólido-líquido del Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE). Tomado de [PSE, “MANUAL DE OPERACIÓN PLANTA DE EXTRACCIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO Y LÍQUIDO-LÍQUIDO,” 2018].

Es importante considerar el uso de sustancias químicas que sean compatibles con los materiales de construcción de los equipos y accesorios. Para ello se debe tener en cuenta que para el equipo de extracción la sustancia debe ser compatible con acero inoxidable 304 (SS 304) y simultáneamente con teflón (PTFE), Viton y EPDM, como se observa en el anexo 2.

2.1.4.b Operación del equipo de Extracción. Antes de establecer el modo de operación del equipo es necesario realizar la adecuación del sistema para ello antes de cada corrida se debe realizar un proceso de purga en cada uno de los equipos entre ellos tanques y válvulas, ya que puede haber acumulación de material residual en las paredes, entradas o salidas de las válvulas ocasionando mal funcionamiento del sistema.

Siempre se debe asegurar la disponibilidad de agua de enfriamiento. Si no se cuenta con un suministro de agua para refrigeración no se puede continuar con el proceso. Por otra parte, es necesario verificar que los indicadores de nivel se encuentren abiertos y las válvulas de las líneas de aceite térmico se encuentren completamente cerradas.

El equipo cuenta con dos modos de operación según la naturaleza de la extracción que se vaya a emplear, por tal razón se detallan a continuación.

#### - Extracción Sólido-Líquido

El arranque del proceso en este modo de operación comienza con la carga del sistema, para ello el material sólido a emplear en la extracción debe ser molido, homogenizado y pesado. La densidad del sólido debe ser determinada. Es necesario revisar que el percolador no contenga líquidos en su interior, para ello abrir las válvulas de purga. Destapar el tanque percolador retirando la tapa, junto con las canastillas (si la hay) y el agitador de doble paleta. Colocar el sólido dentro de la canasta y ubicarla dentro del percolador.

Las canastillas tienen aperturas de 4 mm y 0.5 mm. Si el tamaño de partícula del sólido es menor que el de la malla de la canastilla, envolver el sólido en un medio filtrante (media velada, tela, etc.), evitando que los sólidos salgan de la canastilla y bloqueen las válvulas de purga o la conexión al concentrador [36]. Se recomienda tener presente el volumen que ocupan los sólidos, la canastilla, el agitador y la expansión del solvente a la temperatura de trabajo, para así determinar el volumen de solvente requerido en la extracción, teniendo presente que el tanque debe llenarse al 80 % de su capacidad.

Una vez calculada la cantidad de solvente requerido cargarlo en el percolador a través de la válvula (V-13) y abrir la válvula de alivio del percolador y se procede a la carga lenta.

Para el sistema de calefacción es necesario verificar el nivel de aceite térmico dentro del tanque si está por debajo del 80% cargar con más aceite (de la misma referencia), abrir la válvula de alivio, para conectar el sistema a presión atmosférica. En caso de que el nivel de aceite se encuentre por encima del recomendado drenar el tanque abriendo las válvulas de purga y ajustar el nivel. Luego abrir totalmente la válvula de succión de la bomba y la válvula de recirculación de aceite caliente.

El encendido del sistema de calefacción se da desde el tablero de control, donde se ajusta la temperatura de operación del aceite térmico; se recomienda operar el aceite térmico a 20 °C por encima de la temperatura de operación del percolador o el concentrador []. No exceder la temperatura máxima de operación del aceite (130°C).

El arranque de la unidad de extracción comienza con la apertura del agua de enfriamiento al proceso, la válvula de salida de vapor del percolador y la válvula de entrada al visor de condensación. Una vez que el aceite térmico haya llegado a la temperatura indicada, abrir la válvula de entrada de aceite a la chaqueta del percolador y cerrar la válvula de recirculación de aceite. Posteriormente regular la velocidad de agitación deseada y encender el motor del agitador. Cuando el nivel del condensado haya llegado a la altura deseada en el visor de condensados abrir las válvulas de recirculación de solvente.

La operación de extracción deberá continuar hasta que se realice la recuperación requerida, de manera que el seguimiento a la operación se puede realizar a través del muestreo del extracto, obteniendo pequeñas cantidades de extracto por medio de la apertura de válvulas de muestreo.

Para la concentración del solvente es necesario que la temperatura del aceite térmico este por encima de la temperatura de ebullición del solvente 20°C, por tal razón es necesario acondicionar la temperatura antes de iniciar la concentración. Una vez alcanzado el set point de la temperatura seguir los pasos descritos en la página 26 del equipo.

Para la operación del equipo a presión de vacío y atmosférica se recomienda seguir los pasos descritos en las correspondientes secciones que se encuentran en el manual, allí también se

muestra la secuencia requerida para: la parada del proceso, la descarga y limpieza del percolador, concentrador y demás unidades de proceso.

- Extracción Líquido-Líquido

El arranque del proceso en este modo de operación se da de la misma forma que en la extracción sólido líquido, la diferencia radica en la carga del líquido que contiene el soluto a extraer en el percolador. La carga de solvente de extracción no debe superar el 80% de la capacidad del percolador. De igual forma se recomienda revisar los niveles de aceite térmico empleado en el proceso con la finalidad de obtener los mejores resultados en la etapa de extracción y concentración del extracto.

Una vez cargado el solvente de extracción y el solvente que contiene el soluto a separar, se deben seguir los pasos descritos en la sección anterior para el arranque del equipo de extracción o en su defecto consultar el manual de operación del equipo. Los procesos de lavado de unidades y parada del proceso se realizan de la misma forma que en el modo de operación de extracción sólido líquido.

2.1.41.c Normas de seguridad relacionadas a la columna de absorción. Para hacer uso del equipo de extracción se deben tener en cuenta las siguientes normas y recomendaciones [36]:

- Operar el proceso con mínimo dos personas para evitar accidentes, y respaldar y/o relevar en las actividades del proceso. Informar a la persona responsable el inicio y parada de operación en la planta.
- Operar el equipo en una zona con ventilación adecuada para evitar acumulación de vapores de solventes. De lo contrario se pueden generar atmosferas inflamables o asfixiantes.
- Mantenga en un lugar accesible un botiquín de primeros auxilios
- Mantenga en un lugar accesible un extintor de fuego.
- No separarse de las unidades de proceso por tiempo prolongado. Si es necesario ausentarse, avisar al relevo.
- Las personas que operan el equipo no deben trabajar más de 8 horas continuas sin descanso, el cansancio puede propiciar accidentes graves.

- Evitar el acceso al panel interno de las cajas eléctricas.
- Garantizar el flujo constante de agua de refrigeración. Si durante el proceso se interrumpe la admisión de agua se debe **SUSPENDER INMEDIATAMENTE LA OPERACIÓN**. Apague las resistencias y detenga la bomba de suministro de aceite térmico.
- Nunca descargue el sistema en caliente. Dejar que el equipo se enfríe hasta una temperatura de 25°C para descargarlo (esto puede tardar varias horas por que el sistema está aislado térmicamente). Prevenga accidentes.
- Dejar los equipos limpios y lavados después de la operación evitando la corrosión y la contaminación cruzada entre lotes de procesamiento.
- Para descargar el tanque siempre utilizar overol, guantes de carnaza y si es posible una pechera del mismo material para evitar quemaduras si el material aún está caliente
- Almacenar el solvente concentrado fuera de los colectores para evitar contaminación cruzada entre solventes. Usar envases de material inerte para evitar su desnaturalización.
- Realizar mantenimiento preventivo y correctivo de la unidad de proceso. Ajustar las tuberías que presenten fugas o goteos, cambiar el empaque que sella entre el tanque y la tapa cuando se requiera, limpiar frecuentemente los equipos por acumulación de polvo o materiales extraños. Mantener limpia y aseada el área de operación, y el tablero de control.
- Si se presentan escapes o fugas remediarlas cuando sea posible con las herramientas disponibles. Si la magnitud de la fuga es grande detener la operación y dejar enfriar para poder resolver el problema con seguridad.
- No permita que entre líquido a la bomba de vacío.

2.1.4.d Peligros relacionados. Los peligros relacionados al equipo de extracción se encuentran expuestos en el anexo 1, que corresponde al What If realizado para el centro de proceso de la Universidad de América.

## **2.2 Centro de transformación y adecuación (CETA)**

El Centro de Procesos de la Universidad de América cuenta con el Centro de transformación y adecuación (CETA). En donde se llevan a cabo una serie de operaciones que transforman

ciertos insumos o materias primas mediante procesos físicos y químicos, de esta manera se puede obtener el producto deseado con las especificaciones necesarias.

Esta zona cuenta con un banco de reactores, un tren de evaporadores, un molino y un filtro prensa, como se puede observar en la figura 38.

**Figura 38.**

*Render del Centro de transformación y adecuación (CETA)*



**Nota:** En la figura se evidencia la ubicación de los equipos en el centro de transformación y ubicación. Tomado de [Equipo CEPIIS, “Renders Centro de procesos de innovación para la industria sostenible (CEPIIS),” Fundación Universidad de América. 2022]

A continuación, se presentarán los equipos mencionados anteriormente considerando el diseño, operación, normativa y algunos peligros relacionados.

### 2.2.1 Banco de reactores

Los reactores son equipos en donde se lleva a cabo una reacción química y se evidencian fenómenos de transferencia de masa y calor, difusión y fricción [39]. Para ello, el diseño de los reactores contempla las ecuaciones de las leyes de conservación de la materia y la energía. Además, debe disponerse de información proveniente de diferentes campos: termodinámica, cinética química, mecánica de fluidos, transmisión de calor y transporte de materia [40].

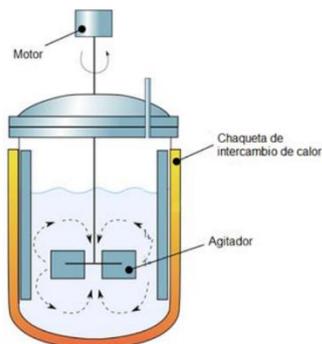
Los reactores son de gran importancia puesto que son la parte central de un proceso químico, por lo tanto, deben proporcionar el suficiente tiempo de residencia para que los reactivos reaccionen, el intercambio de calor necesario y un contacto adecuado entre las fases para facilitar la reacción.

Existen diversos tipos de reactores, los más utilizados en la industria son los reactores batch para la operación por lotes, los reactores continuos de tanque agitado CSTR, los reactores tubulares PFR y los reactores empacados PBR. A continuación, se presentan algunas consideraciones de diseño de estos reactores:

El reactor por lotes no tiene flujo de entrada ni de salida, puesto que el reactor se llena con los reactivos y estos permanecen en el equipo por periodos prolongados que permitan alcanzar altas conversiones. Son utilizados en procesos en donde es complejo manejar una operación continua o se desea probar nuevos procesos.

**Figura 39.**

*Reactor por lotes*

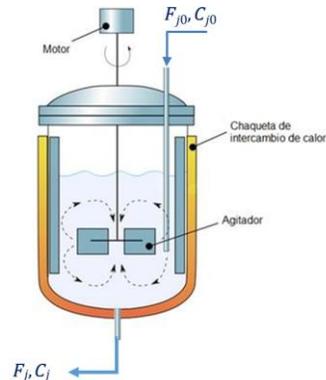


**Nota:** En la figura se evidencia la operación de un reactor por lotes con intercambio de calor. Tomado de [PSE, “MANUAL DE OPERACION BANCO DE REACTORES,” 2018]

En los reactores CSTR se presenta un flujo de entrada de reactivos y un flujo de salida de productos y algunos reactivos sin reaccionar. Se realiza la consideración de que todas las variables son iguales en todos los puntos en el interior del reactor. Es muy utilizado en la industria y usualmente se opera en estado estacionario.

**Figura 40.**

*Reactor CSTR*



**Nota:** En la figura se evidencia la operación de un reactor CSTR con intercambio de calor. Tomado de [PSE, “MANUAL DE OPERACION BANCO DE REACTORES,” 2018]

Los reactores PFR permiten que los materiales reaccionen de manera continua a medida que avanzan por el reactor, por lo tanto, su concentración cambia continuamente en dirección axial a lo largo del reactor. Además, en este tipo de reactores la reacción se lleva a cabo en los tubos y por la coraza fluye servicio de calentamiento o enfriamiento según el tipo de reacción [39]. En su mayoría son utilizados en la industria para reacciones en fase gaseosa.

**Figura 41.**

*Reactor PFR*

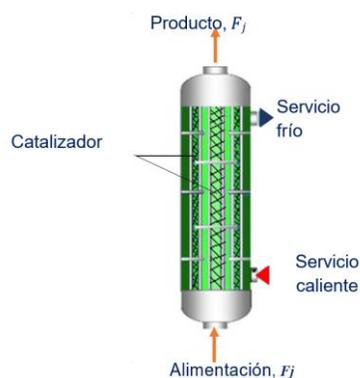


**Nota:** En la figura se evidencia la operación de un reactor PFR, con servicio frío y caliente. Tomado de [PSE, “MANUAL DE OPERACION BANCO DE REACTORES,” 2018]

Los reactores PBR tienen similitudes con los reactores PFR, pero contienen un catalizador sólido empacado en los tubos y un fluido de calentamiento o enfriamiento en la coraza. Este reactor es utilizado en reacciones heterogéneas catalíticas en donde la velocidad de reacción es la masa del catalizador sólido.

**Figura 42.**

*Reactor PBR*



**Nota:** En la figura se evidencia la operación de un reactor PBR, con servicio frío y caliente. Tomado de [PSE, “MANUAL DE OPERACION BANCO DE REACTORES,” 2018]

2.2.1.a Diseño del banco de reactores. Según el manual de operaciones de PSE, el banco de reactores está compuesto por 3 reactores continuos de mezcla perfecta CSTR con 1 L de capacidad, 1 reactor CSTR con 3 L de capacidad, 3 reactores tubulares de flujo pistón PFR con 1 L de capacidad, 1 reactor PFR con 3 L de capacidad y un reactor multitubular de lecho empacado PBR con capacidad de 3 L. El reactor CSTR puede operar de forma continua o por lotes.

El equipo está construido con acero inoxidable 304 y puede ser utilizado en diferentes sistemas de reacción. Además, cuenta con un sistema de alimentación de reactivos, sistema de enfriamiento de producto y sistema de calentamiento.

El sistema de alimentación de reactivos se compone por 2 tanques de alimento de 15 L de capacidad, 2 bombas dosificadoras, 2 intercambiadores de tubos y coraza, 4 rotámetros y 3 mezcladores estáticos en línea. Las bombas dosificadoras con flujo máximo de 8 GPH y presión máxima de 50 psi cuentan con un sistema de amortiguación de pulsaciones, válvula de alivio y válvula de contrapresión. Los mezcladores estáticos están compuestos por 12 elementos de mezcla de una longitud de 12 mm y un diámetro de 10.4 mm y permite hacer la mezcla de reactivos antes de ingresar al reactor PFR.

Por otro lado, el sistema de enfriamiento de producto cuenta con 2 intercambiadores de tubos y coraza y 2 tanques de producto con una capacidad de 15 L.

El sistema de calentamiento se realiza con aceite térmico y considera 2 equipos, el primero para el calentamiento de los reactivos en los precalentadores y el segundo para el calentamiento de los reactores, cada sistema contiene un tanque de aceite de 25 L y una bomba centrífuga. El aceite térmico es un aceite de tipo parafínico de alta estabilidad térmica con viscosidad a 40°C, cSt = 32 y gravedad API 0.88.

El sistema cuenta con un tablero de control de acero inoxidable 304 para el monitoreo y control general de todas las variables de proceso y su respectivo almacenamiento para su posterior análisis.

**Figura 43.**

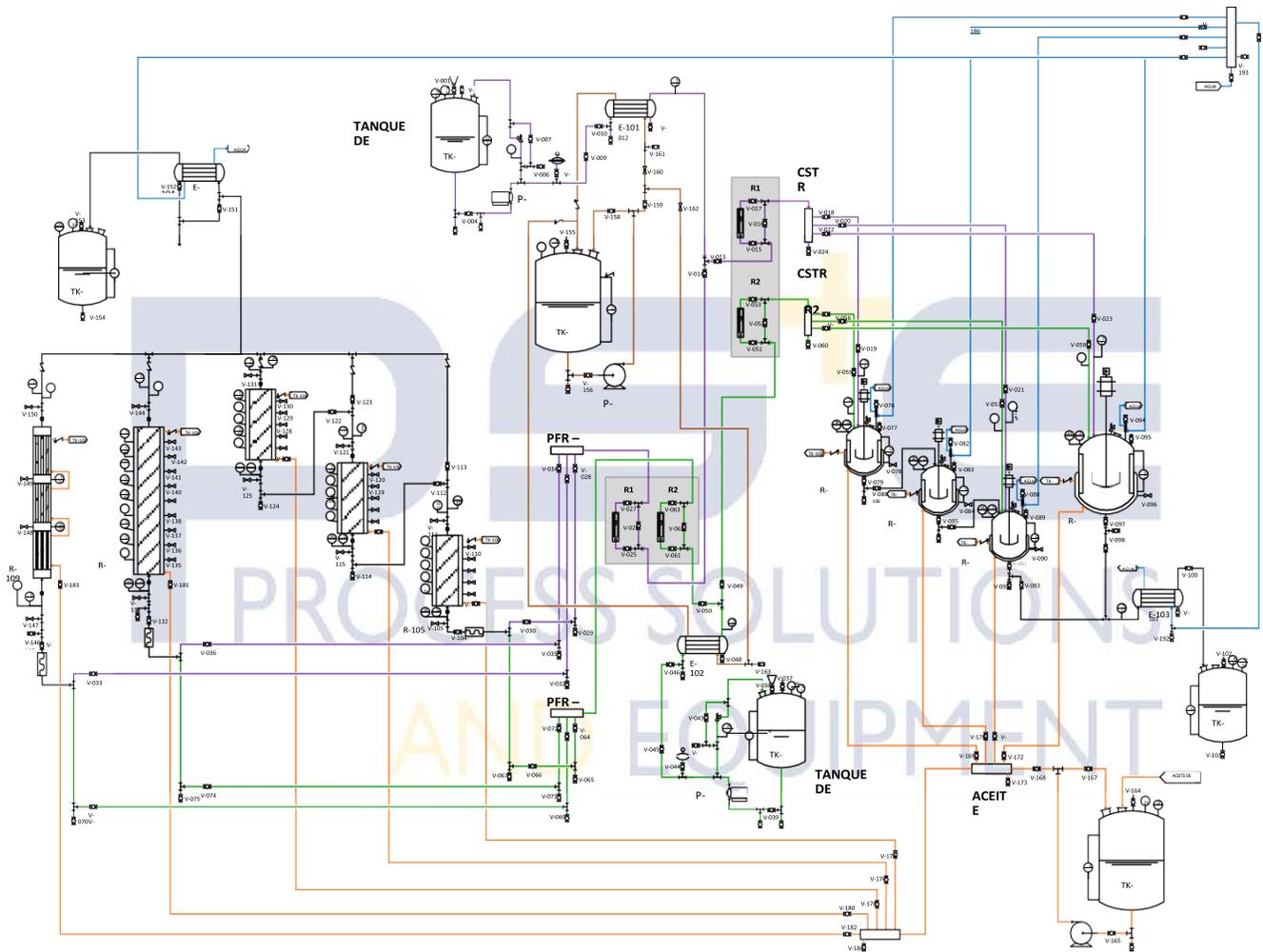
*Banco de reactores del Centro de transformación y adecuación (CETA)*



**Nota:** En la figura se evidencia una fotografía del banco de reactores del del centro de transformación y adecuación (CETA). Tomado de [“PRODUCTOS Y SERVICIOS |PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT.” <https://andreaorjuela.wixsite.com/website/productos-y-servicios> (accessed Jun. 06, 2022)]

**Figura 44.**

*Diagrama de banco de reactores del Centro de transformación y adecuación (CETA)*



**Nota:** En la figura se evidencia un diagrama P&ID del banco de reactores del centro de transformación y adecuación. Tomado de [PSE, “MANUAL DE OPERACION BANCO DE REACTORES,” 2018].

Es importante considerar el uso de sustancias químicas que sean compatibles con los materiales de construcción de los equipos y accesorios. Para ello se debe tener en cuenta que para el banco de reactores las sustancias deben ser compatibles con acero inoxidable 304 (SS 304) y simultáneamente con teflón (PTFE) y EPDM, como se observa en el anexo 2.

2.2.1.b Operación del banco de reactores. Según el manual de operación de PSE, para iniciar con la operación del equipo se debe verificar la limpieza de los tanques y reactores. Después asegurar las tapas de los tanques y reactores, y verificar el nivel del aceite al

igual que el flujo de agua de refrigeración en la planta. Es importante revisar que las válvulas de los indicadores de nivel se encuentren abiertas y asegurar que las válvulas de desagüe de los equipos estén cerradas. Posteriormente, se debe realizar el calentamiento del aceite térmico que puede tardar algunos minutos.

Seguido a esto, es necesario preparar los reactivos y para ello se cuenta con 2 tanques de almacenamiento de reactivos y 2 bombas dosificadoras que alimenta cada reactivo respectivamente [39]. Si los reactivos son líquidos puros, se debe medir la cantidad de líquido a utilizar y adicionarlo lentamente en el tanque, teniendo en cuenta que es necesario realizar una desconexión de la termocupla durante el llenado y una conexión al cerrar el tanque. Si los reactivos están en una solución, primero se debe preparar la solución deseada y adicionarla en el tanque, considerando la desconexión de la termocupla durante el llenado y una conexión al cerrar el tanque.

Si se desea calibrar los rotámetros o las bombas dosificadoras, se debe dirigir al Manual de operación del Banco de reactores propuesto por PSE, en el numeral 7.7 y 7.8.

Para la operación del reactor CSTR por lotes se deben agregar los reactivos como se mencionó anteriormente asegurando las abrazaderas clamp de las tuberías de reactivos, alimentación lateral y condensador, revisando además que el empaque de PTFE se encuentre en una correcta posición. Después, hacer pasar el fluido de calentamiento por el reactor abriendo la válvula correspondiente y considerando la temperatura a la que se definió el calentamiento del aceite térmico.

Cabe aclarar que se pueden trabajar al tiempo hasta con los 4 reactores de tanque agitado, siempre y cuando la temperatura de reacción sea la misma.

En la operación del reactor CSTR continuo, se debe habilitar la línea de flujo hasta el reactor para alimentar los reactivos. Para ello se debe cerrar el retorno al tanque de alimento y revisar que los desagües de toda la línea de flujo de alimento se encuentren cerrados. Después, se debe revisar que los desagües del reactor y el enfriador se encuentren cerrados, posteriormente permitir el flujo. Cuando llegue al nivel establecido,

disminuir el flujo de reactivo y habilitar el rotámetro. Abrir la válvula de descarga para que el producto pase por el enfriador.

Para la operación de los reactores PFR y PBR en modo continuo se deben preparar los reactivos necesarios para la práctica siguiendo las especificaciones descritas en el manual de operación, una vez preparados y cargados los reactivos abrir el paso de la línea de alimento hacia el reactor o serie de reactores seleccionados (1L, 2 en serie, 3 en serie, 3L, PBR), revisar que los desagües del reactor elegido, pre-calentador y el paso a otro equipo no elegido se encuentren cerradas. Dependiendo de la practica seleccionada, abrir las válvulas que permiten el paso de reactivo hacia los equipos, poner en funcionamiento las bombas de suministro.

Luego de la carga de los reactivos, se debe habilitar la línea de calentamiento de los precalentadores, según la temperatura deseada se regula el suministro de válvulas de servicio de calentamiento. Una vez realizado el precalentamiento de los reactivos, se hace pasar el fluido de calentamiento (aceite térmico) al reactor. Con ayuda de las válvulas toma muestras y de las termocuplas supervisar como va ascendiendo el fluido en el reactor. Cuando el flujo llegue a la última válvula, habilitar el enfriador de producto y el tanque. La habilitación del enfriamiento se realiza por medio de la apertura de la válvula de suministro de agua fría.

Cabe resaltar que si en la práctica se emplea un catalizador en el reactor PBR (R-109) se debe seguir el procedimiento anteriormente descrito una vez se haya realizado la carga y adecuación del catalizador. Para introducir el catalizador en el reactor es necesario seguir los pasos descritos en el manual de operación del banco de reactores desarrollado por el fabricante PS+E. [39]

La finalización de la operación se da una vez se logre la estabilización y las tomas de muestra correspondan a las características finales del producto deseado.

2.2.1.c Normas de seguridad relacionadas al banco de reactores. Para hacer uso del secador de bandejas se deben tener en cuenta las siguientes normas y recomendaciones [39]:

- Elementos de protección personal: Las personas que ingresen a la planta piloto y operen el sistema debe contar con gafas de seguridad, casco, bata de laboratorio y guantes de carnaza o resistentes al calor.
- Equipos a alta temperatura: Las altas temperatura pueden representar un riesgo de seguridad para el personal. Por lo tanto, se debe utilizar protección personal que permita evitar quemaduras o lesiones de grado mayor.
- Operar el equipo en una zona con ventilación adecuada para evitar acumulación de vapores de reactivos. De lo contrario se pueden generar atmosferas inflamables o asfixiantes.
- Nunca descargue el sistema en caliente. Dejar que el equipo se enfríe hasta una temperatura de 25°C para descargarlo (esto puede tardar varias horas por que el sistema está aislado térmicamente). Prevenga accidentes.
- Dejar los equipos limpios y lavados después de la operación evitando la corrosión y la contaminación cruzada entre lotes de procesamiento.
- Para descargar el tanque siempre utilizar overol, guantes de carnaza y si es posible una pechera del mismo material para evitar quemaduras si el material aún está caliente.
- Almacenar los reactivos en los lugares adecuados. Usar envases de material inerte para evitar su desnaturalización.
- Realizar mantenimiento preventivo y correctivo de la unidad de proceso. Ajustar las tuberías que presenten fugas o goteos, cambiar el empaque que sella entre el tanque y la tapa cuando se requiera, limpiar frecuentemente los equipos por acumulación de polvo o materiales extraños. Mantener limpia y aseada el área de operación, y el tablero de control.
- Si se presentan escapes o fugas, remediarlas cuando sea posible con las herramientas disponibles. Si la magnitud de la fuga es grande detener.

2.2.1.d Peligros relacionados. Los peligros relacionados al banco de reactores se encuentran expuestos en el anexo 1, que corresponde al What If realizado para el centro de proceso de la Universidad de América.

### **2.2.2 *Tren de evaporadores***

La evaporación es una de las operaciones unitarias claves en la ingeniería química, ya que se utiliza para incrementar la concentración de sólidos de soluciones líquidas por eliminación de disolvente por ebullición [41]. El objetivo de este proceso es poder concentrar una disolución en un soluto no volátil y un solvente volátil, en donde la mayor parte de las evaporaciones industriales se refiere a la eliminación de agua de una solución acuosa.

Un sistema de evaporadores cuenta con un intercambiador de calor, un separador, un condensador y una bomba de vacío. De esta manera es posible aportar el calor sensible y latente de evaporación al alimento líquido, separar la fase líquida concentrada del vapor y condensar el vapor producido.

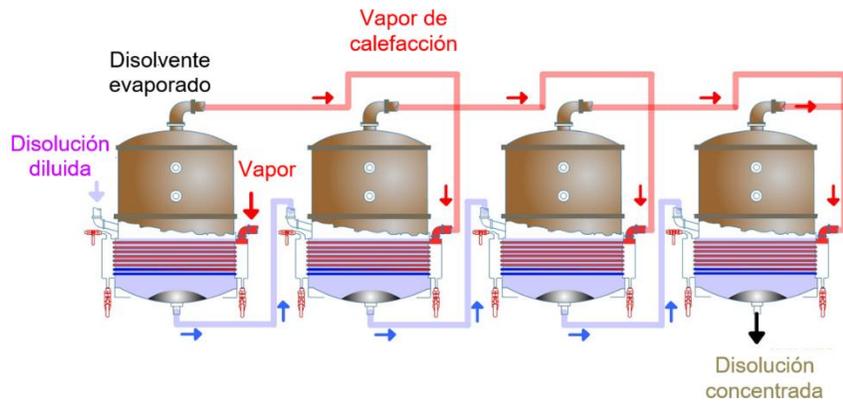
Existen diferentes métodos de operación, sin embargo, en cualquiera de estos el costo más importante del proceso es el vapor de agua consumido. Por lo tanto, los métodos que tiendan a reducir este consumo (o de economía) son muy atractivos [41].

La evaporación de simple efecto utiliza un solo evaporador, en donde el vapor precedente del líquido en ebullición se condensa y desecha. Si el vapor precedente de uno de los evaporadores se introduce como alimentación de calefacción en un segundo evaporador y el vapor precedente de éste se envía al condensador, la operación recibe el nombre de doble efecto [42]. Cuando se utiliza una serie de evaporadores donde solo se consume vapor vivo en un equipo y se reutiliza el vapor generado en las etapas anteriores en los otros equipos, es una evaporación en múltiple efecto.

Por otro lado, existen diversas formas en que puede ser alimentada a los evaporadores del múltiple efecto la solución a concentrar. La primera es en corriente directa o paralela, en donde la solución entra al primer equipo y se dirige al siguiente equipo en la misma dirección que el vapor de calefacción, como se evidencia en la figura 45.

**Figura 45.**

*Evaporadores de cuádruple efecto con alimentación en corriente directa o paralela*

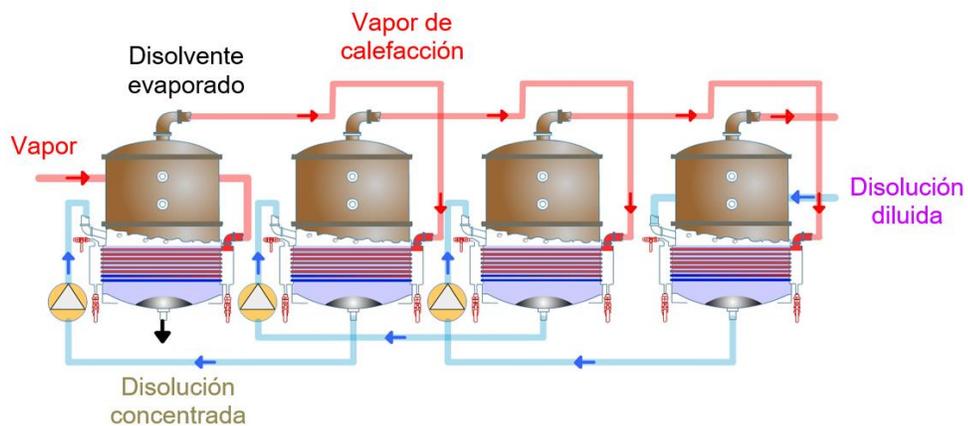


**Nota:** En la figura se evidencia se observa el comportamiento de las corrientes con alimentación paralela. Tomado de [PSE, “MANUAL DE OPERACIÓN TREN DE EVAPORACIÓN,” 2018].

El segundo es en contracorriente y la alimentación entra en el último equipo y se retira como producto concentrado en el primer evaporador.

**Figura 46.**

*Evaporadores de cuádruple efecto con alimentación en contracorriente*



**Nota:** En la figura se evidencia se observa el comportamiento de las corrientes con alimentación en contracorriente. Tomado de [PSE, “MANUAL DE OPERACIÓN TREN DE EVAPORACIÓN,” 2018]

La tercera y última, es por corrientes mixtas, en donde existe una combinación de los tipos de arreglos mencionado anteriormente para formar un arreglo nuevo.

2.2.2.a Diseño del tren de evaporadores. Según el manual de operación entregado por PSE, la unidad de tren de evaporadores cuenta con un sistema de almacenamiento del alimento a concentrar, tanques para la recolección de condensado, tres unidades de evaporación con sistema de calefacción diferente, un condensador de vapor y un tablero de control. El equipo está construido en acero inoxidable 304.

El sistema de alimentación consta de un tanque cilíndrico con capacidad de 38 L de mezcla de trabajo y una bomba centrífuga conectada a la salida del tanque para alimentar a todo el sistema de tren de separadores. El tanque tiene un flotador de nivel máximo y sensor de nivel mínimo, para evitar derrames. A su vez, el sistema cuenta con conexiones para la entrada del alimento y la recirculación del producto de la bomba de alimentación. La temperatura de operación del líquido está en el intervalo de -10 °C hasta 60 °C.

El diseño cuenta con cuatro tipos de evaporadores: evaporadores de tubos verticales, evaporador de tubos horizontales, evaporador de chaqueta y evaporador de circulación forzada.

El evaporador de calandria tubos verticales cuenta con un cabezal inferior y la cámara de separación para transferencia de calor, además de un haz de 12 tubos más un conducto de retorno central. El vapor producido es conducido a un eliminador de arrastre tipo ciclón, aislado con fibra de vidrio [42]. Por otro lado, el equipo cuenta con indicador de nivel externo, y un controlador que opera una bomba para la descarga del producto concentrado del evaporador. Además, la línea de vapor vivo cuenta con un sensor de presión a la entrada, válvula de globo para la regulación del flujo de vapor y una trampa de vapor en la línea de condensados.

Para el evaporador de tubos horizontales se tiene también un cabezal inferior y la cámara de separación para transferencia de calor, pero un haz de 11 tubos en posición horizontal. El vapor producido es conducido a un eliminador de arrastre tipo ciclón aislado con fibra de vidrio, al igual que en el de tubos verticales. La línea de vapor vivo cuenta con la misma instrumentación que el evaporador anterior.

El evaporador de chaqueta se divide en dos secciones, la sección enchaquetada utiliza como fluido de calentamiento vapor y su capacidad es de 17 L, mientras la sección superior es la cámara de separación. El equipo cuenta con un sensor de presión y una válvula de alivio de presión en la cámara de evaporación, además de un sensor de temperatura en la sección enchaquetada [42]. Al igual que en los anteriores, el vapor producido es conducido a un eliminador de arrastre tipo ciclón y la línea de vapor tiene la misma instrumentación.

El evaporador de circulación forzada es un intercambiador de tubos y coraza vertical, que usa vapor como fluido de calentamiento. El licor es bombeado a través del equipo y cuenta con un haz de 9 tubos.

Para el almacenamiento del producto se cuenta con un tanque cilíndrico de 30 L montado en la estructura sobre sensor de peso. Este sistema tiene válvulas para tomar muestras y sensor de temperatura, además de un arreglo de válvulas de nivel visible externo, purga inferior con válvula, y una tapa flanchada removible con empaque y tornillos. En la tapa superior se encuentra una válvula para alivio atmosférico y una conexión para la termocupla.

La condensación del vapor en el último efecto se realiza a través de un intercambiador de tubos y coraza. La línea tiene un visor de condensación y también un tanque de recolección. El tanque tiene una capacidad de 30 L y cuenta con el arreglo de válvulas de nivel visible externo, una conexión para alivio atmosférico, una línea de entrada, un acople a línea de vacío con válvula de aguja, y conexión para purga inferior. Así mismo, la línea de conexión entre el condensador y el tanque también cuenta con un visor de condensación, con un arreglo de válvulas para entrada de condensado, alivio atmosférico, desagüe y salida a tanques de almacenamiento

Los condensados de vapor vivo son conducidos a los tanques de condensados, los cuales tienen una capacidad de 32 L y cuentan con un arreglo de válvulas de nivel visible externo y purga inferior con válvula. Sobre la tapa tiene una válvula para alivio atmosférico, una línea de entrada y una conexión para termocupla.

Finalmente, el sistema posee un tablero de control para el monitoreo remoto de las variables del proceso en cada una de las configuraciones de operación del equipo, ya sea simple efecto, forzada, doble efecto, triple efecto y mixto. Cabe destacar que la interfaz permite energizar todas las bombas del sistema y establecer el caudal en las bombas dosificadoras.

**Figura 47.**

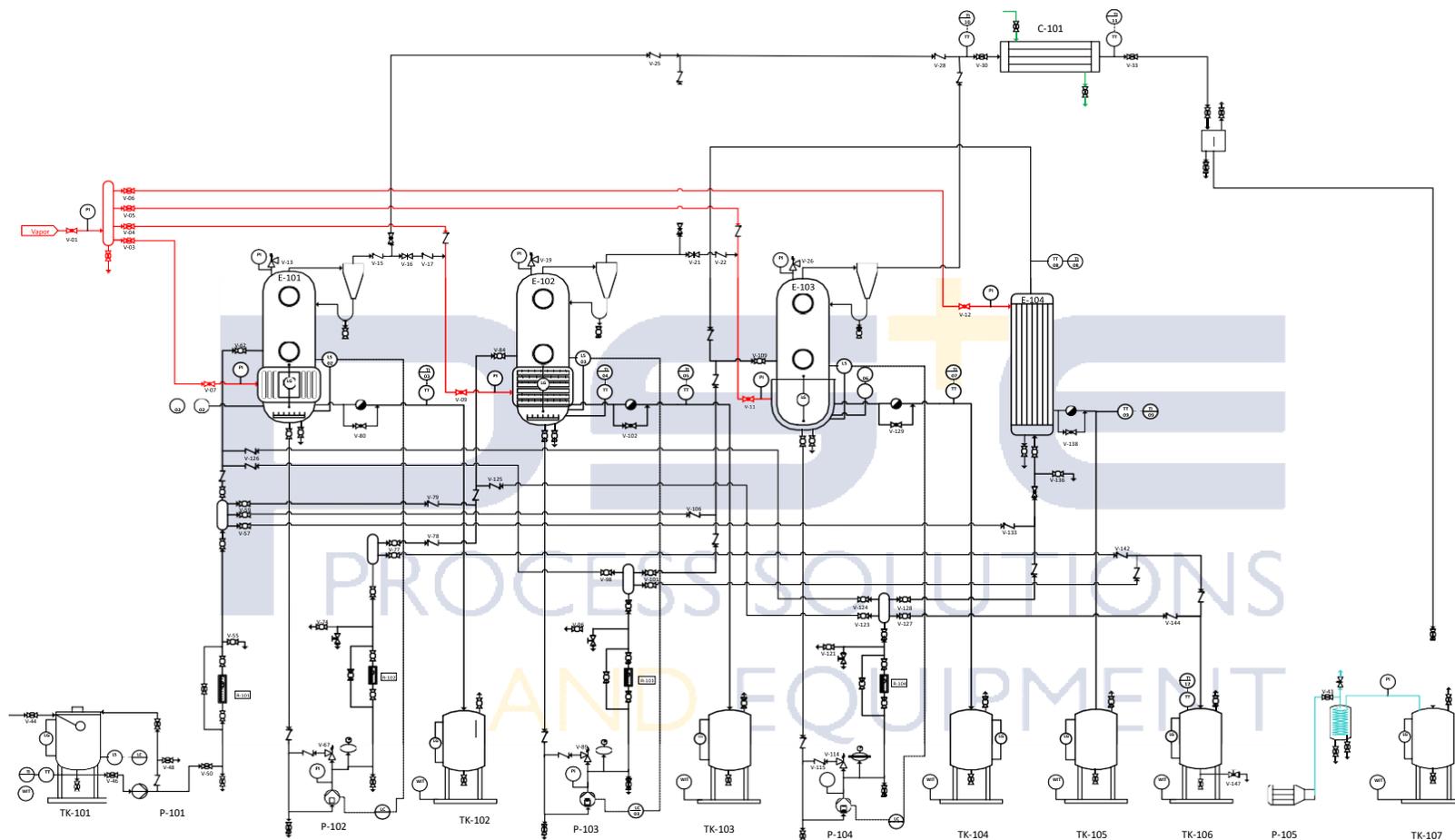
*Tren de evaporadores del Centro de transformación y adecuación (CETA)*



**Nota:** En la figura se evidencia una fotografía del tren de evaporadores del del centro de transformación y adecuación (CETA). Tomado de [“PRODUCTOS Y SERVICIOS |PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT.” <https://andreaorjuela.wixsite.com/website/productos-y-servicios> (accessed Jun. 06, 2022)]

**Figura 48.**

*Diagrama Tren de evaporadores del Centro de transformación y adecuación (CETA)*



**Nota:** En la figura se evidencia un diagrama P&ID del tren de evaporadores del Centro de transformación y adecuación (CETA). Tomado de [PSE, “MANUAL DE OPERACIÓN TREN DE EVAPORACIÓN,” 2018]

2.2.2.b Operación del tren de evaporadores. En la operación del tren de evaporadores se debe tener en cuenta que el sistema se puede emplear con diversas configuraciones considerando el número de efectos, la dirección del flujo de vapor de calentamiento y el tipo de evaporador. Debido a esto, el manual de operación propuesto por PSE describe el protocolo de operación para 6 configuraciones de operación, como se puede observar en la siguiente tabla.

**Tabla 6.** Posibles configuraciones de operación en el tren de evaporadores

<b>Tipos de operación</b>	<b>Configuraciones posibles</b>	<b>Configuración de referencia</b>
Simple efecto	3	Chaqueta
Circulación forzada	1	Chaqueta
Dos efectos en paralelo	1	Calandria 1-Chaqueta
Dos efectos en contracorriente	1	Calandria 1-Chaqueta
Tres efectos en paralelo	1	Calandria 1-Chaqueta – Calandria 2
Tres efectos en contracorriente	1	Calandria 1-Chaqueta- Calandria 2

**Nota:** En la tabla se presentan 6 configuraciones de operación del tren de separación. Tomado de [PSE, “MANUAL DE OPERACIÓN TREN DE EVAPORACIÓN,” 2018].

Por lo tanto, si se desea profundizar más en alguna de estas configuraciones, se debe dirigir al Manual de operación del Tren de separadores propuesto por PSE, en el numeral 6.3.

2.2.2.c Normas de seguridad relacionadas al tren de evaporadores. Para hacer uso del tren de separadores se deben tener en cuenta las siguientes normas y recomendaciones [42].

- Elementos de protección personal: Las personas que ingresen a la planta piloto y operen el sistema debe contar con gafas de seguridad, casco, bata de laboratorio y guantes de carnaza o resistentes al calor.
- Equipos a alta temperatura: Las altas temperatura pueden representar un riesgo de seguridad para el personal. Por lo tanto, se debe utilizar protección personal que permita evitar quemaduras o lesiones de grado mayor.
- Operar el equipo en una zona con ventilación adecuada por cuanto puede haber acumulación de vapores de solventes. De lo contrario se pueden generar atmosferas inflamables o asfixiantes.

- Garantizar el flujo constante de agua de refrigeración. Si durante el proceso se interrumpe la admisión de agua o vapor vivo, se debe suspender inmediatamente la operación.
- Nunca descargue el sistema en caliente. Dejar que el equipo se enfríe hasta una temperatura de 35°C para descargarlo. Prevenga accidentes.
- Dejar los equipos limpios y lavados después de la operación evitando la corrosión y la contaminación cruzada entre lotes de procesamiento.
- Almacenar la solución concentrada y el solvente recolectado fuera de los tanques de producto y/o de solvente para evitar contaminación cruzada entre los materiales. Usar envases de material inerte para evitar su desnaturalización.
- Realizar mantenimiento preventivo y correctivo de la unidad de proceso. Ajustar las tuberías que presenten fugas o goteos, cambiar el empaque que sella entre el tanque y la tapa cuando se requiera, limpiar frecuentemente los equipos por acumulación de polvo o materiales extraños, mantener limpia y aseada el área de operación y el tablero de control.
- Si se presentan escapes o fugas remediarlas cuando sea posible con las herramientas disponibles. Si la magnitud de la fuga es grande detener la operación y dejar enfriar para poder resolver el problema con seguridad.
- No permita que entre líquido a la bomba de vacío.

2.2.2.d Peligros relacionados. Los peligros relacionados al tren de evaporadores se encuentran expuestos en el anexo 1, que corresponde al What If realizado para el centro de proceso de la Universidad de América.

### **3 ANÁLISIS FUNCIONAL DE OPERATIVIDAD (HAZOP) DE LAS ZONAS ANÁLIZADAS EN EL CEPIIS**

Para determinar los riesgos y posibles desviaciones operativas en las zonas del Centro de procesos e innovación para la industria sostenible (CEPIIS), se aplicó un análisis funcional de operatividad HAZOP. Con este fin, se utilizó la estructura representada en la figura 14 que incluye las palabras guías, desviación, causas, consecuencias, salvaguardas y acciones en cada uno de los nodos, y se realizó una valoración del riesgo aplicando la matriz de riesgos operacionales construida anteriormente, figura 6.

Este análisis se llevó a cabo en el Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE) para la columna de destilación, columna de absorción, secador de bandejas SB-500 y el extractor líquido-líquido y sólido-líquido, y en el Centro de transformación y adecuación (CETA) para el banco de reactores y el tren de evaporadores esto debido a que en cada una de las zonas identificadas se contaba con la información mínima obligatoria para el desarrollo del HAZOP, como se menciona en el apartado “1.1.1 Metodología HAZOP” de este documento.

Es importante aclarar que se consideró que la operación de cada uno de estos equipos es independiente, por lo tanto, el análisis no está enfocado al funcionamiento de los equipos en serie, por ejemplo, el banco de reactores cuyo producto de reacción en algunos casos puede dirigirse a la columna de destilación o alguna otra etapa de adecuación y purificación.

Además, el HAZOP de cada equipo se encuentra dividido en nodos que representan diversas partes del sistema con el fin de desarrollar un mejor análisis. El análisis se centra en los riesgos operativos de acuerdo con el modo de operación del equipo, teniendo en cuenta que no se especificó alguna sustancia de trabajo, ya que en los equipos se pueden emplear diversas sustancias según la compatibilidad como se muestra en el anexo 2, y contemplarlos en su totalidad se encuentra fuera del alcance de los objetivos planteados en este trabajo.

A continuación, se presentan las estructuras del HAZOP realizadas para cada equipo del centro de procesos CEPURE y CETA de la planta piloto.

### 3.1 Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE)

#### 3.1.1 Columna de destilación

Tabla 7.

HAZOP Columna de destilación – Nodo TK-101 y TK-102

<b>Proyecto</b>	Columna de destilación - modo de operación destilación simple y destilación azeotrópica						
<b>Nodo</b>	TK-102 / TK-101				<b>P&amp;ID</b>	Figura 24	
<b>Descripción del nodo</b>	Tanque de almacenamiento de reactivo (proceso/solvente)				<b>Fecha</b>	31/05/2022	
<b>Intención del nodo</b>	No sobrepasar el 80% de la capacidad de diseño (50L)						
<i>Desviación</i>		<i>paso/etapa</i>	<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvuardas</i>	<i>Valoración</i>	<i>Recomendaciones</i>
<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>						
<b>NO</b>	Flujo	Entrada	-No se realiza carga del reactivo de alimentación por parte del encargado	-Imposibilidad en la operación de destilación debido a falta de reactivo de alimentación  -Riesgo de sobrecalentamiento en el motor de la bomba de alimentación y posible ruptura de eje	Indicador de nivel situado en el tanque	<b>3A</b>	-Realizar supervisiones periódicas durante la carga de reactivo de alimentación
<b>MÁS</b>			-Se excede la carga del reactivo de alimentación	-Derrame del reactivo de alimentación si se supera el volumen de diseño, que pueden ser tóxicos afectando la integridad del personal		<b>3B</b>	-Realizar supervisiones periódicas durante la carga de reactivo de alimentación  -Abrir válvula de purga para regular el nivel del tanque
<b>MENOS</b>			-Obstrucción en válvulas V-020/022 y V-001/003	-Alimentación insuficiente a la columna de destilación		<b>3B</b>	-Realizar supervisiones periódicas durante la

			-Ruptura o fuga en tubería	-Riesgo de sobrecalentamiento en el motor de la bomba de alimentación y posible ruptura de eje			carga de reactivo de alimentación - Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga
<b>MÁS</b>	Nivel	Interior del tanque	-No se realiza regulación de nivel con las válvulas V-023/024 y V-004/005 -Acumulación de reactivo por obstrucción en tubería o válvulas de control (en fondo) posición cerrada	- Derrame de reactivo por rebosar el volumen máximo  - Inundación de equipos por rebose no diseñados para soportar líquido  -Variación de las condiciones óptimas de operación	-Indicador de nivel situado en el tanque	<b>3C</b>	- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga  -Mantenimiento preventivo al sensor de nivel  -Implementar alarmas por alto nivel (LAH)
<b>MENOS</b>			-No se realiza regulación de nivel con las válvulas de entrada V-022 y V-003 -Apertura de válvulas V-023/025/024 para el TK-102 y V-004/005/006 para el TK-101  - Obstrucción en válvulas de control (en fondo) posición abierta	-Disminución del flujo de salida que alimenta a la columna  -Variación de las condiciones óptimas de operación  -Cavitación del sistema de bombeo de reactivo, conectado a los fondos del tanque - El tanque puede quedar totalmente vacío quedándose sin fase líquida, afectando los conductos y equipos que no están diseñados para el funcionamiento en seco.	-Válvulas de control de nivel	<b>2C</b>	-Implementar alarmas por bajo nivel (LAL)  -Verificar que las válvulas de purga y alimentación a la columna estén cerradas (V-023/025/024 y V-004/005/006) -Mantenimiento preventivo al sensor de nivel - Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga

<b>MÁS</b>	Presión	Interior del tanque	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falla en el indicador de presión en la tubería</li> <li>- Falla en la válvula de alivio V-020 y V-001</li> <li>- Aumento repentino de la presión</li> <li>- Venteo inadecuado del aire o vapor durante el llenado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sobrepresión en el tanque generando pérdida de contención, ruptura de los sellos y ruptura de tuberías</li> <li>- Mayor desgaste en el equipo</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>	- Válvula de alivio de presión V-020	<b>4B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH)</li> <li>-Mantenimiento preventivo al indicador de nivel</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvula de alivio, antes y durante la puesta en marcha</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falla en el indicador de presión en la tubería</li> <li>- Disminución repentina de la presión</li> <li>- Bloqueo de bombas o líneas de succión</li> <li>- Bloqueo de venteo durante el vaciado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Cavitación del sistema de bombeo de reactivo, conectado a los fondos del tanque</li> <li>- Riesgo de implosión en el tanque</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>		<b>2A</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por baja presión (PAL)</li> <li>-Mantenimiento preventivo al indicador de presión</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvula de alivio, antes y durante la puesta en marcha</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Temperatura	Interior del tanque	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura ambiente alta</li> <li>- Aumento de temperatura repentino debido a la naturaleza del reactivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor desgaste en el equipo</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>		<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH)</li> <li>- Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura</li> </ul>

					- Indicador de temperatura situado en el tanque		
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura ambiente baja</li> <li>- Disminución de temperatura repentino debido a la naturaleza del reactivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Riesgo de fragilización del material de construcción del tanque</li> <li>- Generación de cristalizaciones no deseadas</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>		<b>1B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por baja temperatura (TAL)</li> <li>- Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura</li> </ul>

**Nota:** En la tabla se evidencia el HAZOP de la columna de destilación. Algunas desviaciones fueron tomadas de [Vikneswara Jayamaran, Anna Lvova, Qian Ying Ooi, Jia Wei Chong, and Yousra Hassan, “Hazard and Operability Study (HAZOP) Safety Assessment on Formaldehyde Production Plant,” 2002], [Rafael Bosh, “Planta de producción de HCOOH - Seguridad e higiene,” AFOR - Universidad autónoma de Barcelona, 2016]

**Tabla 8.**

*HAZOP Columna de destilación – Nodo HE-101 / HE-102*

<b>Proyecto</b>	Columna de destilación - modo de operación destilación simple y destilación azeotrópica							
<b>Nodo</b>	HE-101 / HE-102						<b>P&amp;ID</b>	Figura 24
<b>Descripción del nodo</b>	Intercambiadores de calor para el precalentamiento del alimento y del solvente						<b>Fecha</b>	31/05/2022
<b>Intención del nodo</b>	Límite a las condiciones requeridas del proceso							
<i>Desviación</i>		<i>paso/ etapa</i>	<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvaguardas</i>	<i>Valoración</i>	<i>Recomendaciones</i>	
<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>							
<b>NO</b>	Flujo	Entrada Alimento	-Cierre de la válvula V-033 y v-013	- Sobre calentamiento de intercambiador de calor	Válvulas de apertura y cierre de suministro	<b>3A</b>	-Implementar un indicador de flujo en la entrada del intercambiador	

		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Obstrucción de las tuberías</li> <li>-No hay líquido de alimentación de proceso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Pérdida deliberada de suministro de fluido de servicio (vapor)</li> <li>-Mayor desgaste en el equipo</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar mantenimiento en los tubos del intercambiador para minimizar pérdidas u obstrucción por ensuciamiento</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvulas</li> </ul>
<b>MÁS</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor presión del líquido en la salida de la bomba.</li> <li>-Fallo en el controlador de flujo</li> <li>- Necesidad de reducción en la entrada (falta de restricción en manipulación de la válvula V-033 y V-013).</li> <li>-Escapes por rotura en los tubos del intercambiador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja eficiencia en el intercambio de calor hacía el fluido de proceso</li> <li>- Mayor demanda de fluido de servicio de calentamiento</li> <li>- Aumento de la caída de presión en el intercambiador de calor</li> </ul>	<b>1B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Implementar un indicador de flujo en la entrada del intercambiador.</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tubería del intercambiador.</li> <li>-Automatizar el proceso para que el flujo de servicio al intercambiador de calor este regulado por respuesta del indicador de temperatura ubicado a la salida del flujo del proceso.</li> </ul>
<b>MENOS</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Obstrucción de las tuberías de entrada del fluido</li> <li>- Fallas en la alimentación del fluido por bomba defectuosa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja eficiencia en el intercambio de calor hacía el fluido de proceso</li> <li>-Sobrecalentamiento del fluido de proceso por falta de regulación</li> </ul>	<b>1B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Implementar un indicador de flujo en la entrada del intercambiador.</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tubería del intercambiador.</li> </ul>

			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necesidad de apertura en la entrada (falta de restricción en manipulación de la válvula V-033 y V-013).</li> <li>-Fallo en el controlador de flujo</li> </ul>				<ul style="list-style-type: none"> <li>-Automatizar el proceso para que el flujo de servicio al intercambiador de calor este regulado por respuesta del indicador de temperatura ubicado a la salida del flujo del proceso.</li> </ul>
<b>INVERSO</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Montaje inadecuado de la instalación</li> <li>- Alta presión corriente arriba o baja presión corriente arriba</li> <li>- Camino incorrecto</li> <li>- Cierre de la válvula V-036</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja eficiencia en el intercambio de calor hacía el fluido de proceso</li> <li>-Sobrepresión en tubería y fallos en el sistema de bombeo por golpe de ariete</li> </ul>		<b>3A</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificar que el sentido del flujo sea el adecuado</li> <li>-Realizar apertura de las válvulas adecuadas para liberar el fluido</li> <li>- Al realizar mantenimientos preventivos, desmonte o montaje verificar el paso correcto del flujo</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Presión	Interior del intercambiador de calor	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Variación de la temperatura óptima a la que se lleva el fluido de proceso</li> <li>- Falla en el indicador de presión</li> <li>- Ensuciamiento o generación de incrustaciones al interior de los tubos del intercambiador.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor desgaste en el equipo</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>	Indicador de presión en tubería	<b>1B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH)</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tubería del intercambiador.</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en la carcasa del intercambiador.</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disminución repentina de presión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja eficiencia en el intercambio de calor</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Implementar un indicador de presión en</li> </ul>

			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento de la caída de presión en el intercambiador de calor</li> <li>-Variación de la temperatura óptima a la que se lleva el fluido de proceso</li> <li>- Falla en el indicador de presión</li> <li>-Fugas al interior de la carcasa</li> </ul>	<p>hacia el fluido de proceso</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>		<b>3B</b>	<p>la entrada y salida de las corrientes en el intercambiador.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por baja presión (PAL)</li> <li>- Realizar verificación y mantenimiento periódico en el equipo.</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Temperatura	Interior del intercambiador de calor	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento descontrolado en el fluido de servicio</li> <li>- Tuberías de fluido de servicio sucias u obstruidas</li> <li>-Fallo en las tuberías del intercambiador por rotura</li> <li>- Falla en el indicador de temperatura</li> <li>-Fallo en el control de la temperatura</li> <li>- Aumento de temperatura repentino debido a la naturaleza del reactivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sobre calentamiento en el intercambiador de calor</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> <li>- Mayor consumo energético y desgaste en el equipo</li> <li>-Mayor demanda de flujo de proceso para regular la temperatura</li> </ul>	Indicador de temperatura situado en la salida del equipo	<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH)</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería y carcasa en el equipo</li> <li>-Automatizar el proceso para que el flujo de servicio al intercambiador de calor este regulado por respuesta del indicador de temperatura ubicado a la salida del flujo del proceso.</li> </ul>

<b>MENOS</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Poco suministro de fluido de servicio (V-037 y V-017 no controlada)</li> <li>- Tuberías de fluido de servicio sucias u obstruidas</li> <li>- Disminución de temperatura repentino debido a la naturaleza del reactivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> <li>-Mayor demanda de flujo de servicio para regular la temperatura</li> <li>- No es posible obtener la temperatura deseada a la salida del equipo debido a una baja eficiencia en el intercambio de calor hacía el fluido de proceso</li> </ul>	Válvulas de apertura y cierre de suministro de servicio y de proceso	<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH)</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería y carcasa en el equipo</li> <li>-Automatizar el proceso para que el flujo de servicio al intercambiador de calor este regulado por respuesta del indicador de temperatura ubicado a la salida del flujo del proceso.</li> </ul>

**Nota:** En la tabla se evidencia el HAZOP de la columna de destilación. Algunas desviaciones fueron tomadas de [Vikneswara Jayamaran, Anna Lvova, Qian Ying Ooi, Jia Wei Chong, and Yousra Hassan, “Hazard and Operability Study (HAZOP) Safety Assessment on Formaldehyde Production Plant,” 2002], [Rafael Bosh, “Planta de producción de HCOOH - Seguridad e higiene,” AFOR - Universidad autónoma de Barcelona, 2016]

**Tabla 9.**

*HAZOP Columna de destilación – Nodo C-101 Alimentación*

<b>Proyecto</b>	Columna de destilación - modo de operación destilación simple y destilación azeotrópica			<b>P&amp;ID</b>	Figura 24
<b>Nodo</b>	C-101			<b>Fecha</b>	31/05/2022
<b>Descripción del nodo</b>	Columna de destilación del centro de procesos (Alimentación)				
<b>Intención del nodo</b>	Límite a las condiciones requeridas del proceso sin afectaciones a la integridad de la columna				
<i>Desviación</i>		<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvaguardas</i>	<i>Valoración</i>
					<i>Recomendaciones</i>

<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>	<i>paso/ etapa</i>					
<b>NO</b>	Flujo	Entrada a la columna	<ul style="list-style-type: none"> <li>-No hay líquido de alimentación de proceso</li> <li>- Fuga, obstrucción o rotura total de una sección de la tubería que conduce el fluido de alimentación</li> <li>- Cierre de las válvulas V-036/016</li> <li>- Avería o posible falla en la bomba de suministro de alimentación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No es posible realizar el proceso de destilación</li> <li>-Parada de emergencia</li> <li>- Sobrecalentamiento del rehervidor</li> <li>- Pérdida deliberada de fluido de servicio (Vapor y agua)</li> <li>- No hay caudal de reflujo y se presenta un aumento de la temperatura</li> </ul>	Válvulas de apertura y cierre de suministro de proceso	<b>3A</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Implementar un indicador de flujo a la entrada de la columna.</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería y válvulas de servicio</li> <li>-Realizar mantenimiento y verificación a la bomba de suministro</li> <li>- Si el fallo es de la bomba contar con una de respaldo</li> </ul>
<b>MÁS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor presión del líquido en la salida de la bomba.</li> <li>- Necesidad de reducción en la entrada (falta de restricción en manipulación de la válvula V-036/016)</li> <li>-Mayor flujo de alimentación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Riesgo de inundación de la columna</li> <li>- Disminución en el tiempo de residencia en cada plato, generando menor contacto líquido-vapor</li> <li>- Riesgo de arrastre</li> <li>- Aumento de la presión de la columna por inundación en el fondo</li> </ul>	Parada de emergencia (Botón rojo), bloqueo de bombas de suministro	<b>3B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Implementar un indicador de flujo a la entrada de la columna.</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de las válvulas de servicio</li> <li>- Regular flujo de salida de la bomba (ajustar presión)</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falla en el suministro de la bomba</li> <li>- Necesidad de apertura en la entrada (falta de restricción en manipulación de la válvula V-036/016)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pérdida de eficiencia en la operación de la columna</li> <li>-Menor producto de destilación en fondos y cimas</li> <li>- Desgaste del equipo</li> </ul>		<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Regular flujo de salida de la bomba (ajustar presión)</li> <li>- Evaluar la posibilidad de una bomba auxiliar</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fuga, obstrucción o rotura de una sección de la tubería que conduce el fluido de alimentación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Formación de espuma en los sumideros de la columna</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- verificar el estado de las tuberías y válvulas de servicio</li> <li>- Implementar un indicador de flujo a la entrada de la columna.</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento de presión repentino</li> <li>-Incrustaciones localizadas en los intercambiadores precalentadores HE-101/102</li> <li>- Aumento descontrolado en el fluido de servicio en el intercambiador de calor HE-101/102 el cual funciona como precalentador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> <li>- Mal funcionamiento de la columna</li> <li>- Pérdida de eficiencia en la operación de la columna</li> </ul>	Indicador de temperatura situado en la columna	<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mantenimiento preventivo a los indicadores de temperatura situados en la columna</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería y carcasa en el intercambiador de calor HE-101/102</li> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH)</li> </ul>
<b>MENOS</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Flujo excesivo de alimentación a la columna</li> <li>- Fallas en el intercambiador de calor por ensuciamiento</li> <li>-Falta de control en el suministro de vapor de servicio en el intercambiador HE-101/102</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> <li>- Mal funcionamiento de la columna</li> <li>- Pérdida de eficiencia en la operación de la columna</li> <li>- Mayor gasto energético</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mantenimiento preventivo a los indicadores de temperatura situados en la columna</li> <li>- Implementar un indicador de flujo a la entrada de la columna</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería y carcasa en el intercambiador de calor HE-101/102</li> <li>- Implementar alarmas por baja temperatura (TAL)</li> </ul>

<b>MÁS</b>	Presión		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento de la caída de presión en el intercambiador de calor (precalentador alimento de la columna HE-101/102)</li> <li>-Variación de la temperatura óptima a la que ingresa el fluido de proceso</li> <li>- Mayor presión del líquido en la salida de la bomba.</li> <li>- Obstrucción en las válvulas V-036/016</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mal funcionamiento de la columna</li> <li>-Formación de espuma en los sumideros de la columna</li> <li>- Desgaste del equipo por sobrepresión, posibilidad de explosión en zona localizada de la columna</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> <li>- Pérdida de eficiencia en la operación de la columna</li> </ul>	Indicador de presión situado en la columna	<b>4A</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mantenimiento preventivo a los indicadores de presión situados en la columna</li> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH)</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería y carcasa en el intercambiador de calor HE-101/102</li> <li>-Implementación de válvulas de alivio o disco de rotura para liberar presión y evitar explosión en alguna zona del equipo</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disminución de la caída de presión en el intercambiador de calor (precalentador alimento de la columna HE-101/102)</li> <li>-Variación de la temperatura óptima a la que se lleva el fluido de proceso</li> <li>- Menor presión del líquido en la salida de la bomba.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> <li>- Pérdida de eficiencia en la operación de la columna</li> <li>- Mal funcionamiento de la columna</li> </ul>		<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mantenimiento preventivo a los indicadores de presión situados en la columna</li> <li>- Implementar alarmas por baja presión (PAL)</li> <li>-Realizar verificación de la presión en la bomba</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de</li> </ul>

							tubería y carcasa en el intercambiador de calor HE-101/102
--	--	--	--	--	--	--	--

**Nota:** En la tabla se evidencia el HAZOP de la columna de destilación. Algunas desviaciones fueron tomadas de [Vikneswara Jayamaran, Anna Lvova, Qian Ying Ooi, Jia Wei Chong, and Yousra Hassan, “Hazard and Operability Study (HAZOP) Safety Assessment on Formaldehyde Production Plant,” 2002], [Rafael Bosh, “Planta de producción de HCOOH - Seguridad e higiene,” AFOR - Universidad autónoma de Barcelona, 2016]

**Tabla 10.**

*HAZOP Columna de destilación – Nodo C-101 Cima*

<b>Proyecto</b>	Columna de destilación - modo de operación destilación simple y destilación azeotrópica						
<b>Nodo</b>	C-101				<b>P&amp;ID</b>	Figura 24	
<b>Descripción del nodo</b>	Columna de destilación del centro de procesos (Cima)				<b>Fecha</b>	31/05/2022	
<b>Intención del nodo</b>	Límite a las condiciones requeridas del proceso sin afectaciones a la integridad de la columna						
<i>Desviación</i>		<i>paso/ etapa</i>	<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvaguardas</i>	<i>Valoración</i>	<i>Recomendaciones</i>
<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>						
NO	Flujo	Cima de la columna	- Obstrucción en las válvulas de reflujo V-096/099	- Posible aumento de la temperatura de la columna	Válvulas de apertura y cierre de suministro	3A	- Mantenimiento preventivo al indicador de flujo (rotámetro)
			- Avería o posible falla en la bomba de suministro de reflujo	- Mayor demanda de alimentación en la columna			- Implementar un indicador de flujo en las tuberías del reflujo
			- Fuga, obstrucción o rotura total de una sección de la tubería que conduce el destilado	- Perdida de eficiencia en la operación de la columna			- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza en las válvulas reflujo V-096/099 y en las tuberías
			- Falla en el rotámetro (indicador de flujo)	- Parada de emergencia			- Realizar mantenimiento y verificación a la bomba de suministro de reflujo
MÁS			- Flujo de alimentación a la columna demasiado alto	- Posible disminución de la temperatura de la columna		3B	- Verificar que la relación de reflujo sea la adecuada para el proceso

		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Variación de la relación de reflujo</li> <li>- Falta de restricción en manipulación de las válvulas V-096/099 (demasiada abierta)</li> <li>- Falla en el rotámetro (indicador de flujo)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Riesgo de inundación en la columna</li> <li>- Pérdida de eficiencia en la operación de la columna</li> <li>- Dificultad en el contacto entre las fases del proceso</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disminuir la cantidad de alimentación</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza en las válvulas reflujo V-096/099</li> <li>- Mantenimiento preventivo al indicador de flujo (rotámetro)</li> </ul>
<b>MENOS</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flujo de alimentación a la columna demasiado bajo</li> <li>- Reflujo en la columna muy alto</li> <li>- Falta de restricción en manipulación de las válvulas V-096/099 (demasiada cerrada)</li> <li>- Temperatura de control elevada</li> <li>- Falla en el rotámetro (indicador de flujo)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pérdida de eficiencia en la operación de la columna</li> <li>- Dificultad en el proceso de separación y afectación en la pureza del producto deseado</li> <li>- Mayor demanda de alimentación en la columna</li> <li>- Desgaste del equipo</li> </ul>	Indicador de flujo situado en la columna	<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumentar la cantidad de alimentación</li> <li>- Verificar que la relación de reflujo sea la adecuada para el proceso</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza en las válvulas reflujo V-096/099</li> <li>- Implementar un controlador de temperatura</li> <li>- Mantenimiento preventivo al indicador de flujo (rotámetro)</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento de presión repentino</li> <li>- La temperatura de rectificación en la columna es alta</li> <li>- Aumento descontrolado en el flujo de destilado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Riesgo de sobrepresión en la columna</li> <li>- Pérdida de eficiencia en la operación de la columna</li> <li>- Dificultad en el proceso de separación y afectación en la pureza del producto deseado</li> </ul>	Indicador de temperatura situado en la columna	<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura</li> <li>- Verificar el indicador de presión en la cima de la columna</li> <li>- Realizar mantenimiento y verificación a la bomba de suministro de reflujo</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Es demasiado bajo el flujo de reflujo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Desgaste del equipo</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificar que la relación de reflujo sea la adecuada para el proceso</li> </ul>
<b>MENOS</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disminución de presión repentina</li> <li>- Ebullición insuficiente en la columna</li> <li>- Sobre enfriamiento del condensador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perdida de eficiencia en la operación de la columna</li> <li>- Se presenta el riesgo de goteo</li> <li>- Falla en el proceso de separación y afectación en la pureza del producto deseado</li> <li>- Parada del sistema</li> </ul>		<b>3B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura</li> <li>- Verificar el indicador de presión en la cima de la columna</li> <li>- Verificar el adecuado funcionamiento del condensador</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Presión	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mal funcionamiento del condensador de la columna</li> <li>- Aumento de temperatura repentino</li> <li>- Obstrucción en las válvulas de reflujo V-096/099</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perdida de eficiencia en la operación de la columna</li> <li>- Riesgo de inundación en la columna</li> <li>- Dificultad en el proceso de separación y afectación en la pureza del producto deseado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Indicador de presión situado en la columna</li> </ul>	<b>3B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mantenimiento preventivo al indicador de presión</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza en el condensador</li> <li>- Verificar el indicador de temperatura en la cima de la columna</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza en las válvulas reflujo V-096/099</li> </ul>
<b>MENOS</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falla en el indicador de presión</li> <li>- Disminución de temperatura repentino</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perdida de eficiencia en la operación de la columna</li> <li>- Dificultad en el proceso de separación y afectación en el reflujo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Válvulas de apertura y cierre de suministro</li> </ul>	<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mantenimiento preventivo al indicador de presión</li> <li>- Verificar el indicador de temperatura en la cima de la columna</li> </ul>

			- Obstrucción en las válvulas de reflujo V-096/099	- Riesgo de implosión en la columna			- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza en las válvulas reflujo V-096/099
<b>MENOS</b>	Composición		- Se presentan fallas en el condensador - La relación de reflujo utilizada es inadecuada	- Dificultad en el proceso de separación y afectación en la pureza del producto deseado	Válvulas de apertura y cierre de suministro	<b>1C</b>	- Implementar indicador de flujo en la corriente del condensador y del rehervidor

**Nota:** En la tabla se evidencia el HAZOP de la columna de destilación. Algunas desviaciones fueron tomadas de [Vikneswara Jayamaran, Anna Lvova, Qian Ying Ooi, Jia Wei Chong, and Yousra Hassan, “Hazard and Operability Study (HAZOP) Safety Assessment on Formaldehyde Production Plant,” 2002], [Rafael Bosh, “Planta de producción de HCOOH - Seguridad e higiene,” AFOR - Universidad autónoma de Barcelona, 2016]

**Tabla 11.**

*HAZOP Columna de destilación –Nodo C-101 Fondos*

<b>Proyecto</b>	Columna de destilación - modo de operación destilación simple y destilación azeotrópica						
<b>Nodo</b>	C-101					<b>P&amp;ID</b>	Figura 24
<b>Descripción del nodo</b>	Columna de destilación del centro de procesos (Fondos)					<b>Fecha</b>	31/05/2022
<b>Intención del nodo</b>	Límite a las condiciones requeridas del proceso sin afectaciones a la integridad de la columna						
<i>Desviación</i>		<i>paso/ etapa</i>	<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvaguardas</i>	<i>Valoración</i>	<i>Recomendaciones</i>
<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>						
<b>NO</b>	Flujo	Fondo de la columna	-Falla de la columna de destilación -Rotura total de tubería - Fuga en alguna línea del rehervidor	- Parada de emergencia - Sobre calentamiento del rehervidor -Posibles derrames de reactivo del proceso	Válvulas de apertura y cierre de suministro de proceso	<b>3A</b>	-Realizar mantenimiento preventivo a la columna para evitar afectaciones - Realizar mantenimiento preventivo y limpieza en el rehervidor - Realizar mantenimiento preventivo y limpieza en

		<ul style="list-style-type: none"> <li>- No se realiza carga previa en el rehervidor</li> <li>-Apertura o escape de flujo en las válvulas de purga y calibración del rehervidor (V-164/165)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Riesgo de contaminación</li> <li>- Mal funcionamiento en la columna</li> <li>- Desgaste de los equipos</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>las válvulas reflujo V-098/118 y en las tuberías</li> <li>- Implementar un indicador de flujo a en la entrada que conecta al rehervidor desde el fondo de la columna</li> </ul>
<b>MÁS</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cierre u obstrucción en válvula de suministro de la columna al rehervidor ( V-097)</li> <li>- Inundación en el fondo de la columna</li> <li>-Falta de restricción en manipulación de las válvulas V-096/099 (demasiada abierta)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor demanda de fluido de servicio de calentamiento</li> <li>- Riesgo de ruptura en tramos de tubería cercanos a los fondos de la columna</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación, destilado fuera de la composición deseada</li> <li>- Riesgo de derrame y sobrepresión</li> </ul>	Parada de emergencia (Botón rojo), bloqueo de bombas de suministro	<b>3B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Implementar automatización de control de flujo mediante válvulas de control</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza en el rehervidor</li> <li>-Realizar mantenimiento preventivo a la columna para evitar afectaciones</li> <li>- Implementar un indicador de flujo a en la entrada que conecta al rehervidor desde el fondo de la columna</li> </ul>
<b>MENOS</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Problemas en el rehervidor</li> <li>-Obstrucción de tubería en el reflujo del rehervidor</li> <li>-Falta de restricción en manipulación de las válvula V-118 (demasiada cerrada)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Dificultad en el proceso de separación y afectación en la pureza del producto deseado</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación, destilado fuera de la composición deseada</li> </ul>		<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Implementar automatización de control de flujo mediante válvulas de control</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza en el rehervidor</li> <li>- Implementar un indicador de flujo a en la entrada que conecta al rehervidor desde el fondo de la columna</li> </ul>

			-Apertura o escape de flujo en las válvulas de purga y calibración del rehervidor (V-164/165)	- Mayor consumo energético			- Verificar que la relación de reflujo sea la adecuada para el proceso
<b>MÁS</b>	Temperatura		- Presión de la columna alta  - Aumento en los tiempos de ebullición  -Flujo de alimentación alto  - Gran suministro de vapor en el rehervidor	- Riesgo de sobrepresión en la columna  - Perdida de eficiencia en la operación de la columna  - Dificultad en el proceso de separación y afectación en la pureza del producto deseado  -Disminución en el contacto entre líquido-vapor en el proceso  - Mayor desgaste en partes del equipo y rehervidor	Indicador de temperatura situado en la columna y rehervidor	<b>2B</b>	- Verificar el indicador de presión en el fondo de la columna y en el rehervidor  - Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura  - Verificar que la relación de reflujo sea la adecuada para el proceso  - Realizar un adecuado control de flujo en la recirculación al fondo de la columna y en la alimentación  -Regular el flujo de vapor de servicio en el rehervidor con el fin de regular la temperatura
<b>MENOS</b>			- Suministro deficiente de vapor en el rehervidor  - Incrustaciones o ensuciamiento en los tubos del rehervidor  -Obstrucción o rotura de tubería en el rehervidor  - Ebullición insuficiente (bajo nivel en la columna)	- Menor obtención de producto de destilado en cimas  - Perdida de eficiencia en la operación de la columna  - Presión diferencial en la columna baja  - Mayor consumo energético en la operación de la columna			Válvulas de apertura y cierre de suministro

							<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor demanda de flujo de servicio en el rehervidor</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- con el fin de regular la temperatura</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza en el rehervidor</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Presión	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento del nivel en la columna</li> <li>- Aumento en los tiempos de ebullición (ebullición muy alta)</li> <li>- Obstrucción en las válvulas de recirculación V-097/118</li> <li>- Aumento deliberado en la carga de alimento a la columna</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor desgaste del equipo</li> <li>- Riesgo de fuga o rotura de tubería de flujo de proceso</li> <li>- Desgaste del equipo por sobrepresión, posibilidad de explosión en zona localizada de la columna</li> <li>- Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>	Indicador de presión situado en la columna	<b>3B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza en el rehervidor</li> <li>- Verificar el indicador de temperatura en el fondo de la columna</li> <li>- Implementar alarmas por baja presión (PAL)</li> <li>- Mantenimiento preventivo a los indicadores de presión situados en la columna</li> </ul>			
<b>MENOS</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fuga de flujo de servicio (Vapor) en el rehervidor</li> <li>- Insuficiencia en la ebullición</li> <li>- Fuga o rotura de tubería que permite el escape del flujo en el proceso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Variación de las condiciones óptimas de operación</li> <li>- Riesgo de inundación en la columna</li> <li>- Pérdida de eficiencia en la operación de la columna</li> <li>- Mal funcionamiento de la columna</li> </ul>	Válvulas de apertura y cierre de suministro	<b>3B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mantenimiento preventivo a los indicadores de presión situados en la columna</li> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH)</li> <li>- Regular el flujo de vapor de servicio en el rehervidor con el fin de regular la temperatura</li> </ul>			
<b>MÁS</b>	Composición	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pérdidas de flujo por deterioro o rotura en tubos del rehervidor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>	Válvulas de apertura y cierre de suministro	<b>1C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar un adecuado control de flujo en el</li> </ul>			

			- Contaminación del flujo de proceso	- Reducción de pureza del producto en cimas		rehervidor (suministro-recirculación)
			- Procesos de control de composición deficientes	- Perdida de eficiencia en la operación de la columna		
<b>MENOS</b>			-Falla en el rehervidor	- Baja pureza en el producto de destilado		- Realizar control según especificación del producto de destilado deseado.
				- Perdida de eficiencia en la operación de la columna		

**Nota:** En la tabla se evidencia el HAZOP de la columna de destilación. Algunas desviaciones fueron tomadas de [Vikneswara Jayamaran, Anna Lvova, Qian Ying Ooi, Jia Wei Chong, and Yousra Hassan, “Hazard and Operability Study (HAZOP) Safety Assessment on Formaldehyde Production Plant,” 2002], [Rafael Bosh, “Planta de producción de HCOOH - Seguridad e higiene,” AFOR - Universidad autónoma de Barcelona, 2016]

### 3.1.2 Columna de absorción

**Tabla 12.**

HAZOP Columna de absorción – Nodo TK-101

<b>Proyecto</b>		Columna de absorción empacada - modo de operación absorción de gases						
<b>Nodo</b>		TK-101					<b>P&amp;ID</b>	Figura 30
<b>Descripción del nodo</b>		Tanque de solvente fresco					<b>Fecha</b>	31/05/2022
<b>Intención del nodo</b>		No sobrepasar el 80% de la capacidad de diseño (50L)						
<i>Desviación</i>		<i>paso/ etapa</i>	<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvaguardas</i>	<i>Valoración</i>	<i>Recomendaciones</i>	
<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>							
<b>NO</b>	Flujo	Entrada	-No se realiza carga del solvente fresco por parte del cargado	-Imposibilidad en la operación de absorción debido a falta de solvente ingresado a la columna	Indicador de nivel situado en el tanque	<b>3A</b>	-Realizar supervisiones periódicas durante la carga del solvente en el tanque	

			- No se realiza recirculación del solvente recolectado en el tanque TK-102				- Verificar que la válvula de recirculación V-45 se encuentre abierta
<b>MÁS</b>			-Se excede la carga del solvente fresco al tanque TK-101  - No se controla el flujo de la corriente de recirculación del solvente recuperado	-Derrame del solvente si se supera el volumen de diseño  - Sobrepresión en la tubería debido al flujo excesivo en su interior		<b>3B</b>	-Realizar supervisiones periódicas durante la carga del solvente en el tanque  -Abrir válvula de purga para regular el nivel del tanque  - Implementar un indicador de flujo en la tubería referente a la recirculación del solvente
<b>MENOS</b>			-Apertura de válvulas V-03/04  -Obstrucción en válvulas de alimentación y recirculación V-02/45  -Ruptura o fuga en tubería  - El flujo de la corriente de recirculación del solvente es bajo	-Alimentación insuficiente de solvente a la columna de absorción  -Riesgo de sobrecalentamiento en el motor de la bomba de alimentación y posible ruptura de eje		<b>3B</b>	-Realizar supervisiones periódicas durante la carga del solvente en el tanque - Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga -Verificar que las válvulas de purga y alimentación a la columna estén cerradas (V-03/04) - Implementar un indicador de flujo en la tubería referente a la recirculación del solvente
<b>MÁS</b>	Nivel	Interior del tanque	-No se realiza regulación de nivel con las válvulas V-02/09/45  -Acumulación del solvente por obstrucción en tubería	- Derrame del solvente por rebosar el volumen máximo  - Inundación de equipos por rebose no diseñados para soportar líquido	-Indicador de nivel situado en el tanque	<b>3C</b>	- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga  -Mantenimiento preventivo al sensor de nivel

			-Válvulas de control V-04/03 (en fondo) posición cerrada	-Variación de las condiciones óptimas de operación			-Implementar alarmas por alto nivel (LAH)
<b>MENOS</b>			-Falla en el sensor de nivel  -No se realiza regulación de nivel con las válvulas de entrada V-02  -Apertura de válvulas V-03/04  - Obstrucción en válvulas de control (en fondo) posición abierta	-Disminución del flujo de salida que alimenta a la columna  -Variación de las condiciones óptimas de operación  -Cavitación del sistema de bombeo de solvente, conectado a los fondos del tanque  - El tanque puede quedar totalmente vacío quedándose sin fase líquida, afectando los conductos y equipos que no están diseñados para el funcionamiento en seco.	-Válvulas de control de nivel	<b>2C</b>	-Implementar alarmas por bajo nivel (LAL)  -Verificar que las válvulas de purga y alimentación a la columna estén cerradas (V-03/04)  -Mantenimiento preventivo al sensor de nivel  - Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga
<b>MÁS</b>	Presión	Interior del tanque	- Venteo inadecuado del aire o vapor durante el llenado - Falla en la válvula de alivio V-01 - Aumento repentino de la presión	-Variación de las condiciones óptimas de operación	- Indicador de presión situado en la tubería	<b>4B</b>	- Implementar indicador de presión en el tanque  -Mantenimiento preventivo al indicador de nivel  - Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvula de alivio
<b>MENOS</b>			- Disminución repentina de la presión por apertura de la válvula de alivio	-Cavitación del sistema de bombeo de reactivo, conectado a los fondos del tanque	- Válvula de alivio de presión V-01	<b>2A</b>	- Implementar indicador de presión en el tanque

			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bloqueo de bombas o líneas de succión</li> <li>- Bloqueo de venteo durante el vaciado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Riesgo de implosión en el tanque</li> <li>- Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mantenimiento preventivo al indicador de presión</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvula de alivio</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Temperatura	Interior del tanque	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falla en el indicador de temperatura</li> <li>- Temperatura ambiente alta</li> <li>- Aumento de temperatura repentino debido a la naturaleza del solvente</li> </ul>			<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH)</li> <li>- Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura ambiente baja</li> <li>- Disminución de temperatura repentino debido a la naturaleza del solvente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Riesgo de fragilización del material de construcción del tanque</li> <li>- Generación de cristalizaciones no deseadas</li> <li>- Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>	- Indicador de temperatura situado en el tanque	<b>1B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por baja temperatura (TAL)</li> <li>- Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura</li> </ul>

**Nota:** En la tabla se evidencia el HAZOP de la columna de absorción. Algunas desviaciones fueron tomadas de [Vikneswara Jayamaran, Anna Lvova, Qian Ying Ooi, Jia Wei Chong, and Yousra Hassan, “Hazard and Operability Study (HAZOP) Safety Assessment on Formaldehyde Production Plant,” 2002], [Enoch Israel Vega Aguillón, “Análisis de escenarios de riesgo en la planta endulzadora ‘U-502’ de la refinería Francisco I. Madero utilizando HYSYS dinámico,” Tecnológico Nacional de México, Tamaulipas, México, 2015], [Daniel Alcón Álvarez, “Diseño e implantación de sistema de seguridad industrial para una columna de rectificación para la concentración de ácido fluorhídrico,” Universidad de Cádiz, 2011]

**Tabla 13.**

HAZOP Columna de absorción – Nodo Compresor y humidificador

<b>Proyecto</b>	Columna de absorción empacada - modo de operación absorción de gases						<b>P&amp;ID</b>	Figura 30
<b>Nodo</b>	Compresor y humidificador de aire						<b>Fecha</b>	31/05/2022
<b>Descripción del nodo</b>	Compresor de paletas rotatorias y columna humidificadora del compuesto que será absorbido							
<b>Intención del nodo</b>	Límite a las condiciones requeridas del proceso							
<i>Desviación</i>		<i>paso/ etapa</i>	<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvaguardas</i>	<i>Valoración</i>	<i>Recomendaciones</i>	
<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>							
<b>MÁS</b>	Temperatura	Compresor	-El fluido de alimentación al compresor viene a elevada temperatura.	-Variación de las condiciones óptimas de operación - Mayor desgaste en el equipo y posibilidad de fugas en el mismo	Indicador de temperatura situado a la salida del compresor	<b>1B</b>	- Implementar un indicador de temperatura a la entrada del compresor - Implementar alarma por alta temperatura (TAH)	
	Presión		-El fluido de alimentación al compresor viene con una presión elevada  - Se presentan obstrucciones en las tuberías o válvulas V-20/21	- Se pueden producir fugas por las bridas  -Variación de las condiciones óptimas de operación  - Mayor desgaste en el equipo y posibilidad de fugas en el mismo	Indicador de presión situado a la salida del compresor	<b>2B</b>	- Implementar un indicador de presión a la entrada del compresor - Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvulas conectadas al compresor - Implementar alarma por alta presión (PAH)	
<b>MENOS</b>				-Fallas en la alimentación al compresor (tuberías y válvula V-19)	-El compresor sigue trabajando sin llegar a alcanzar el valor previsto para la presión de descarga -No se abre la válvula de descarga y el gas comprimido no es evacuado	Indicador de presión situado a la salida del compresor	<b>2B</b>	- Implementar un indicador de presión a la entrada del compresor - Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvulas conectadas al compresor

				- Mayor desgaste en el equipo			- Implementar alarma por baja presión (PAL)		
<b>NO</b>	Flujo	Humidificador de aire	- Se encuentran cerradas las válvulas V-20/21 evitando el flujo de aire proveniente del compresor	- Imposibilidad en la operación de humidificar el aire debido a falta de flujo		<b>3B</b>	- Verificar que las válvulas de alimentación se encuentren abiertas		
			- No hay flujo de entrada de agua o algún compuesto diferente para emplearse en la absorción(V-26/24)	- Mayor desgaste en el equipo (sobrecalentamiento)			- Desperdicio de flujo de servicio de vapor de agua para humidificar el aire seco	- Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvulas	- Verificar que ingrese el flujo de agua u otro compuesto diferente al equipo
			- Obstrucción de las tuberías	- No será posible dirigir el flujo de aire húmedo a la columna de absorción			- Implementar un indicador de flujo en las corrientes de entrada al equipo		
<b>MÁS</b>			- Mayor presión del aire a la salida del compresor	- Mayor consumo de flujo de agua de servicio para humidificar o saturar el aire seco		<b>3C</b>	- Implementar un indicador de flujo en las corrientes de entrada al equipo		
	- Necesidad de reducción en la entrada (falta de restricción en manipulación de la válvula V-20/21).	- Inundación de la columna debido a un alto flujo de aire húmedo a contracorriente en su interior	- Verificar el indicador de presión a la salida del compresor						
	- Mayor flujo de alimentación de agua u otro compuesto al humidificador	- Mayor desgaste en el equipo	- Verificar que la relación entre el aire y el vapor de servicio a ingresar sea la adecuada						
<b>MENOS</b>			- Menor presión del aire a la salida del compresor	- Variación en el porcentaje óptimo de humedad en el proceso		<b>3C</b>	- Realizar seguimiento de la humedad mediante los indicadores de humedad para así ajustar flujos		
			- Variación en el porcentaje óptimo de humedad en el	- Realizar seguimiento de la humedad mediante los					

			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necesidad de apertura en la entrada (falta de restricción en manipulación de la válvula V-20/21).</li> <li>- Menor flujo de alimentación de agua u otro compuesto al humidificador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>aire húmedo que alimenta el proceso</li> <li>- Pérdida de eficiencia en la absorción (menor flujo de gas)</li> <li>- Escape de flujo de aire húmedo o gas suministrado a la torre de absorción</li> <li>- Inundación en la columna debido a que el solvente cae por gravedad al fondo de la columna y se acumula</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>indicadores de humedad para así ajustar flujos</li> <li>- Verificar el indicador de presión a la salida del compresor</li> <li>- Verificar que la relación entre el aire y el vapor de servicio a ingresar sea la adecuada</li> <li>- Implementar un indicador de flujo en las corrientes de entrada al equipo</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Presión	Humidificador de aire	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falla en la válvula de alivio V-25</li> <li>- Aumento repentino de la presión</li> <li>- Venteo inadecuado del aire o vapor durante el llenado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sobrepresión en el tanque generando pérdida de contención, ruptura de los sellos y ruptura de tuberías</li> <li>- Mayor desgaste en el equipo</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>	- Indicador de presión situado en la tubería	<b>3A</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH)</li> <li>-Mantenimiento preventivo al indicador de nivel</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvula de alivio</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disminución repentina de la presión</li> <li>- Bloqueo de bombas o líneas de succión</li> <li>- Bloqueo de venteo durante el vaciado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Dificultad en el proceso de transferencia de masa de vapor de agua en el aire seco</li> <li>- Pérdida de eficiencia en la absorción (menor arrastre)</li> <li>- Problemas en la incorporación del vapor de agua en el aire seco</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>			- Válvula de alivio de presión V-25

							tuberías y válvula de alivio
--	--	--	--	--	--	--	------------------------------

**Nota:** En la tabla se evidencia el HAZOP de la columna de absorción. Algunas desviaciones fueron tomadas de [Vikneswara Jayamaran, Anna Lvova, Qian Ying Ooi, Jia Wei Chong, and Yousra Hassan, “Hazard and Operability Study (HAZOP) Safety Assessment on Formaldehyde Production Plant,” 2002], [Enoch Israel Vega Aguillón, “Análisis de escenarios de riesgo en la planta endulzadora ‘U-502’ de la refinería Francisco I. Madero utilizando HYSYS dinámico,” Tecnológico Nacional de México, Tamaulipas, México, 2015], [Daniel Alcón Álvarez, “Diseño e implantación de sistema de seguridad industrial para una columna de rectificación para la concentración de ácido fluorhídrico,” Universidad de Cádiz, 2011]

**Tabla 14.**

*HAZOP Columna de absorción – Nodo Tanque de solvente gastado*

<b>Proyecto</b>	Columna de absorción empacada - modo de operación absorción de gases						
<b>Nodo</b>	Columna de absorción - Tanque de solvente gastado				<b>P&amp;ID</b>	Figura 30	
<b>Descripción del nodo</b>	Compresor de paletas rotatorias y columna humidificadora del compuesto que será absorbido				<b>Fecha</b>	31/05/2022	
<b>Intención del nodo</b>	Límite a las condiciones requeridas del proceso						
<i>Desviación</i>		<i>paso/ etapa</i>	<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvaguardas</i>	<i>Valoración</i>	<i>Recomendaciones</i>
<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>						
MÁS	Temperatura	Operación de la columna	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falta de control de la temperatura en el proceso de humidificación</li> <li>-Falla en los indicadores de temperatura</li> <li>- El suministro de gas presenta temperatura elevada fuera de los rangos de operación permitidos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Degradación del empaque o lecho de la columna si la absorción es de COV'S</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> <li>-Variación en la composición obtenida en las corrientes de producto de la columna de absorción</li> </ul>	Indicadores de temperatura situados en la columna y en la tubería de suministro	<b>2C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar mantenimiento y limpieza a los indicadores de temperatura</li> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH)</li> <li>- Implementar un indicador de temperatura a la entrada del gas a absorber (V-30)</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Aumento repentino de la presión en la columna de absorción</li> <li>- Sobrecalentamiento en el equipo o equipos auxiliares (Compresor/Bomba) al superar las condiciones de operación o diseño</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor desgaste del equipo al trabajar bajo temperaturas superiores a las de operación o diseño</li> <li>-Absorción de más de un componente debido al aumento de difusividad por aumento proporcional de la temperatura</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificar los indicadores de presión situados en la columna</li> <li>-Verificar que los flujos de suministro a la columna estén dentro del rango de temperatura de operación de no ser así realizar ajuste o acondicionamiento</li> <li>- Conocer las temperaturas máximas de operación permitidas por los diseños de los equipos</li> </ul>
<b>MENOS</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falta de control de la temperatura en el proceso de humidificación</li> <li>-Falla en los indicadores de temperatura</li> <li>-Disminución repentina de la presión en la columna de absorción</li> <li>- Disminución significativa en el suministro de alimento (Solvente/gas) a la columna de absorción</li> <li>- Falta de control de la temperatura en el suministro de solvente a la columna</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mayor desgaste en los equipos ya que la temperatura puede estar fuera de los rangos operativos y de diseño</li> <li>-Variación en la composición obtenida en las corrientes de producto de la columna de absorción</li> <li>- Pérdida de eficiencia en la operación de la columna</li> <li>- Disminución de la difusividad el proceso de transferencia de masa en la columna entre el solvente y el gas (Baja eficiencia de absorción)</li> <li>-Temperaturas demasiado bajas impiden la absorción del compuesto de interés</li> </ul>	<b>2C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar mantenimiento y limpieza a los indicadores de temperatura</li> <li>- Implementar alarmas por baja temperatura (TAL)</li> <li>- Implementar un indicador de temperatura a la entrada del gas a absorber (V-30)</li> <li>- Verificar los indicadores de presión situados en la columna</li> <li>-Verificar que los flujos de suministro a la columna estén dentro del rango de temperatura de operación de</li> </ul>

				presente en la corriente de alimentación			no ser así realizar ajuste o acondicionamiento
<b>NO</b>	Flujo	Alimentación a la columna Solvente/Gas	-Obstrucción o taponamiento en tuberías y válvulas de suministro (V-32/10/11)  -Avería o taponamiento en la bomba y/o compresor de suministro  -Rotura parcial o total de tramos de tubería  -Apertura total de válvulas de purga (V-08/V-31)	- No se lleva a cabo el proceso de absorción al no suministrar alimento a la columna (Solvente/ Gas)  - Parada de emergencia del equipo	Válvulas de apertura y cierre de suministro de proceso	<b>3A</b>	-Implementar un indicador de flujo a la entrada de la columna tanto a la entrada de gas como de solvente  - Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería y válvulas de servicio  -Realizar mantenimiento y verificación a la bomba y compresor de suministro  - Si el fallo es de la bomba o compresor contar con un respaldo
<b>MÁS</b>			- Necesidad de reducción en la entrada (falta de restricción en manipulación de la válvula V-10/11/32).  -Aumento de la temperatura en el suministro.	-No se puede llevar a cabo una correcta absorción de gases en la columna teniendo desproporción en la relación solvente de extracto-gas  - Riesgo de inundación de la columna  - Aumento de la presión de la columna  - Baja eficiencia en el proceso de absorción debido al exceso de gas o solvente	Parada de emergencia (botón rojo), bloqueo de bombas de suministro	<b>3B</b>	-Implementar un indicador de flujo a la entrada de la columna tanto a la entrada de gas como de solvente  - Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería y válvulas de servicio
<b>MENOS</b>			- Necesidad de apertura en la entrada (falta de restricción en manipulación de la válvula V-10/11/32).	-No se puede llevar a cabo una correcta absorción de gases en la columna teniendo desproporción en			<b>2B</b>

			<p>-Obstrucción o taponamiento en tuberías y válvulas de suministro (V-32/10/11)</p>	<p>la relación solvente de extracto-gas</p> <p>- Baja eficiencia en el proceso de absorción debido a un menor flujo de producto</p> <p>-Menor transferencia de masa en proceso de absorción del gas en el solvente</p>			<p>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería y válvulas de servicio</p>
<b>INVERSO</b>			<p>- Falla en la bomba de suministro de solvente fresco</p> <p>-Falla en el compresor de suministro de aire seco</p>	<p>- Inconsistencia en el funcionamiento de la columna</p> <p>- Parada de emergencia</p>		<b>3A</b>	<p>-Realizar mantenimiento y verificación de la bomba y/o compresor</p> <p>- Si el fallo es de la bomba o compresor contar con un respaldo</p>
<b>MÁS</b>	Presión	Operación de la columna	<p>-Aumento significativo de la presión del gas de entrada y/o aire húmedo de suministro</p> <p>-Aumento de los flujos y/o temperatura de suministro a la columna</p> <p>- Mayor presión de solvente fresco a la salida de la bomba y de aire seco en el compresor (Falla en los equipos)</p> <p>- Ensuciamiento u obstrucción en válvulas o tuberías</p>	<p>-El solvente se empieza acumular y obstruye la sección transversal entera al flujo, evitando que el empaque mezcle al gas y al solvente efectivamente.</p> <p>-Mayor consumo de energía en la bomba y el compresor debido al aumento de la potencia</p> <p>-Riesgo de fuga de gas y deterioro del material del equipo</p> <p>- Baja eficiencia en el proceso de absorción (Riesgo de sobrepresión en la columna)</p>	Válvulas de apertura y cierre de suministro de proceso	<b>3B</b>	<p>- Implementar alarmas por alta presión (PAH)</p> <p>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería y válvulas de servicio</p> <p>- Realizar mantenimiento y verificación a los indicadores de presión, bomba y/o compresor</p> <p>- Implementar válvulas de alivio y/o disco de ruptura en la columna</p> <p>- Si el fallo es de la bomba o compresor contar con un respaldo</p>

<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Disminución significativa de la presión del gas de entrada y/o aire húmedo de suministro</li> <li>-Disminución de los flujos de suministro a la columna</li> <li>- Menor presión de solvente fresco a la salida de la bomba y de aire seco en el compresor (Falla en los equipos)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja eficiencia en el proceso de absorción debido a un menor flujo de producto</li> <li>-Menor transferencia de masa en proceso de absorción del gas en el solvente</li> <li>- Variación de las condiciones óptimas del proceso, lo cual perjudica la meta de diseño y operación de la columna</li> </ul>	Parada de emergencia (botón rojo), bloqueo de bombas de suministro	<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar mantenimiento y verificación a los indicadores de presión, bomba y/o compresor</li> <li>- Si el fallo es de la bomba o compresor contar con un respaldo</li> <li>- Implementar alarmas por baja presión (PAL)</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Composición	Cima y Fondo de la columna	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pérdidas de flujo por deterioro o rotura en tubos de suministro de gas</li> <li>- Contaminación del flujo de proceso</li> <li>- Procesos de control de composición deficientes</li> <li>- Evaporación del líquido por aumento de la temperatura en la tubería de entrada en la tubería de entrada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> <li>- Reducción de pureza gaseoso, libre del componente de interés absorbido</li> <li>- Pérdida de eficiencia en la operación de la columna</li> <li>- Baja difusividad en la absorción</li> </ul>	Válvulas de apertura y cierre de suministro	<b>1C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar control de la composición de solvente fresco y gas suministrado al proceso</li> <li>- Verificar que los valores de presión y temperatura estén entre los rangos permisibles del proceso</li> <li>-Realizar procedimientos adecuados de purga y carga de nuevo alimento a la columna siguiendo los protocolos descritos en el manual</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Cambios repentinos de la presión y/o temperatura a través de la tubería en el suministro</li> <li>-Disminución significativa de la composición del gas de entrada y/o aire húmedo de suministro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja pureza en el producto deseado</li> <li>- Pérdida de eficiencia en la operación de la columna (Aumento de la</li> </ul>		<b>1C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar control de la composición de solvente fresco y gas suministrado al proceso</li> <li>- Verificar que los valores de presión y temperatura estén entre los rangos permisibles del proceso</li> </ul>

				cantidad de líquido en el gas)		
--	--	--	--	--------------------------------	--	--

**Nota:** En la tabla se evidencia el HAZOP de la columna de absorción. Algunas desviaciones fueron tomadas de [Vikneswara Jayamaran, Anna Lvova, Qian Ying Ooi, Jia Wei Chong, and Yousra Hassan, “Hazard and Operability Study (HAZOP) Safety Assessment on Formaldehyde Production Plant,” 2002], [Enoch Israel Vega Aguillón, “Análisis de escenarios de riesgo en la planta endulzadora ‘U-502’ de la refinería Francisco I. Madero utilizando HYSYS dinámico,” Tecnológico Nacional de México, Tamaulipas, México, 2015], [Daniel Alcón Álvarez, “Diseño e implantación de sistema de seguridad industrial para una columna de rectificación para la concentración de ácido fluorhídrico,” Universidad de Cádiz, 2011]

**Tabla 15.**

*HAZOP Columna de absorción – Nodo TK-103*

<b>Proyecto</b>	Columna de absorción empacada - modo de operación absorción de gases						
<b>Nodo</b>	TK-103				<b>P&amp;ID</b>	Figura 30	
<b>Descripción del nodo</b>	Tanque de solvente gastado				<b>Fecha</b>	31/05/2022	
<b>Intención del nodo</b>	No sobrepasar el 80% de la capacidad de diseño (50L)						
<i>Desviación</i>		<i>paso/etapa</i>	<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvaguardas</i>	<i>Valoración</i>	<i>Recomendaciones</i>
<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>						
<b>NO</b>	Flujo	Entrada	-No se realiza la descarga desde la columna de absorción del solvente gastado -Cierre total de la válvula V-34 y apertura de la válvula V-33 - No hay presencia de alimento en la columna (falla total)	-Imposibilidad en la operación de absorción debido al no haber recirculación de solvente gastado -Riesgo de sobrecalentamiento en el motor de la bomba de retorno de solvente y posible ruptura de eje - Falla en sistema de la trampa de vacío debido a la falta de gases condensables	Indicador de nivel situado en el tanque	<b>3A</b>	-Realizar supervisiones periódicas para evidenciar que se realice la descarga desde la columna del solvente gastado - Verificar que la válvula V-34 se encuentre abierta y la relación de flujo con la válvula de purga V-33 sea adecuada -Realizar supervisiones periódicas durante la alimentación de solvente a la columna

				- No es posible realizar la recirculación del solvente gastado en el proceso		
<b>MÁS</b>			- No se controla el flujo de alimentación a la columna generando exceso de solvente gastado.	-Derrame del solvente si se supera el volumen de diseño (Pérdida por contención)  - Sobrepresión en la tubería debido al flujo excesivo en su interior		<b>3B</b>  -Realizar supervisiones periódicas durante la descarga del solvente en el tanque -Abrir válvula de purga V-33 para regular el nivel del tanque - Implementar un indicador de flujo en la tubería referente a la entrada del solvente gastado en el tanque
<b>MENOS</b>			-Apertura de válvulas V-39/40/41  -Obstrucción en la tubería o la válvula de alimentación V-34  -Ruptura o fuga en tubería de alimentación  - El flujo de la corriente de alimentación del solvente gastado es bajo	-Alimentación insuficiente de solvente a la columna de absorción  -Riesgo de sobrecalentamiento en el motor de la bomba de retorno de solvente y posible ruptura de eje  - No es posible realizar la recirculación del solvente gastado en el proceso		<b>3B</b>  -Realizar supervisiones periódicas durante la descarga del solvente en el tanque - Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga -Verificar que las válvulas de purga y alimentación a la columna estén cerradas (V-34/33) - Implementar un indicador de flujo en la tubería referente a la entrada del solvente gastado en el tanque
<b>MÁS</b>	Nivel	Interior del tanque	-No se realiza regulación de nivel con las válvulas V-39/34	- Derrame del solvente por rebosar el volumen máximo	-Indicador de nivel situado en el tanque	<b>3C</b>  - Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga

			-Acumulación del solvente por obstrucción en tubería o válvulas de control (en fondo) posición cerrada	- Inundación de equipos por rebose no diseñados para soportar líquido -Variación de las condiciones óptimas de operación			-Mantenimiento preventivo al sensor de nivel -Implementar alarmas por alto nivel (LAH)
<b>MENOS</b>			-Falla en el sensor de nivel	-Disminución del flujo del solvente recirculado al TK-101 -Variación de las condiciones óptimas de operación	-Válvulas de control de nivel	<b>3B</b>	-Implementar alarmas por bajo nivel (LAL)
			-No se realiza regulación de nivel con las válvulas de entrada V-34	-Cavitación del sistema de bombeo de retorno del solvente, conectado a los fondos del tanque - El tanque puede quedar totalmente vacío quedándose sin fase líquida, afectando los conductos y equipos que no están diseñados para el funcionamiento en seco.			-Mantenimiento preventivo al sensor de nivel  - Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga
<b>MÁS</b>	Presión	Interior del tanque	- Falla en la válvula de alivio V-36	-Sobrepresión en el tanque generando pérdida de contención, ruptura de los sellos y ruptura de tuberías	- Válvula de alivio de presión V-36	<b>4B</b>	- Implementar un indicador de presión en el tanque TK-103 - Implementar alarmas por alta presión (PAH)
			- Aumento repentino de la presión	- Mayor desgaste en el equipo			- Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvula de alivio
<b>MENOS</b>			- Disminución repentina de la presión	-Cavitación del sistema de bombeo del solvente recuperado, conectado a los fondos del tanque - Riesgo de implosión en el tanque		<b>2A</b>	- Implementar un indicador de presión en el tanque TK-103 - Implementar alarmas por baja presión (PAL)
			- Bloqueo de bombas o líneas de succión				

			- Afectaciones en el funcionamiento de la trampa de vacío	-Variación de las condiciones óptimas de operación			- Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvula de alivio
<b>MÁS</b>	Temperatura	Interior del tanque	- Falla en el indicador de temperatura - Temperatura de transferencia de flujo de servicio alta - Aumento de temperatura repentino debido a la naturaleza del solvente	- Mayor desgaste en el equipo - Aumento repentino de la presión -Variación de las condiciones óptimas de operación	- Indicador de temperatura situado en el tanque	<b>2B</b>	- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH)  - Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura
<b>MENOS</b>			- Falla en el indicador de temperatura - Temperatura de transferencia de flujo de servicio baja - Disminución de temperatura repentino debido a la naturaleza del solvente	-Disminución repentina de la presión - Generación de cristalizaciones no deseadas -Variación de las condiciones óptimas de operación			- Implementar alarmas por baja temperatura (TAL)  - Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura

**Nota:** En la tabla se evidencia el HAZOP de la columna de absorción. Algunas desviaciones fueron tomadas de [Vikneswara Jayamaran, Anna Lvova, Qian Ying Ooi, Jia Wei Chong, and Yousra Hassan, “Hazard and Operability Study (HAZOP) Safety Assessment on Formaldehyde Production Plant,” 2002], [Enoch Israel Vega Aguillón, “Análisis de escenarios de riesgo en la planta endulzadora ‘U-502’ de la refinería Francisco I. Madero utilizando HYSYS dinámico,” Tecnológico Nacional de México, Tamaulipas, México, 2015], [Daniel Alcón Álvarez, “Diseño e implantación de sistema de seguridad industrial para una columna de rectificación para la concentración de ácido fluorhídrico,” Universidad de Cádiz, 2011]

### 3.1.3 Secador de bandejas SB-500

**Tabla 16.**

*HAZOP Nodo Secador de bandejas*

<b>Proyecto</b>	Secador de bandejas SB500		
<b>Nodo</b>	Secador de bandejas	<b>P&amp;ID</b>	Figura 33

<b>Descripción del nodo</b>		Cámara de secado con un sistema de bandejas construido en acero Inox 304				<b>Fecha</b>	31/05/2022
<b>Intención del nodo</b>		Límite a las condiciones requeridas del proceso sin afectaciones a la integridad del secador					
<i>Desviación</i>		<i>paso/etapa</i>	<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvaguardas</i>	<i>Valoración</i>	<i>Recomendaciones</i>
<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>						
NO	Flujo	Entrada de aire	- El ventilador centrífugo no se encuentra encendido	- No es posible realizar el proceso de secado ya que no hay entrada de aire	Indicador de velocidad ubicado en el sistema de ductos	3A	- Implementar un indicador de flujo a la entrada del ducto, después del ventilador centrífugo
			- Se presentan obstrucciones en el filtro del sistema de toma de aire	- Variación de las condiciones óptimas de operación			- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza en el filtro del sistema
				- Desgaste del equipo			- Verificar el adecuado funcionamiento del ventilador
MÁS	Flujo	Entrada de aire	- Se presentan fallas en el ventilador centrífugo	- El proceso de secado no se llevará a cabo adecuadamente	Indicador de velocidad ubicado en el sistema de ductos	2C	- Implementar un indicador de flujo a la entrada del ducto, después del ventilador centrífugo
			- Aumento repentino en el variador de velocidad del ventilador	- Flujo de aire excesivo y gasto de energía innecesario			- Verificar el adecuado funcionamiento del ventilador
			- Fallas en el indicador de velocidad	- Variación de las condiciones óptimas de operación			
MENOS	Flujo	Entrada de aire		- Mayor desgaste del filtro y ventilador en el equipo	Indicador de velocidad ubicado en el sistema de ductos	2C	
			- Se presentan fallas en el ventilador centrífugo	- El proceso de secado no será eficiente			

			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disminución repentina en el variador de velocidad del ventilador</li> <li>- Posibles fugas en el ducto por donde se transporta el aire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> <li>- Mayor tiempo de residencia en el equipo</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificar el adecuado funcionamiento del ventilador</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza al variador de velocidad del ventilador</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Humedad	Entrada de aire	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La ubicación de la planta es en los cerros, cuyo aire ambiente tiene una humedad relativa alta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El aire caliente de entrada no puede retener por completo el alto contenido de humedad del material a secar</li> <li>- Mayor flujo de aire caliente</li> <li>- Mayor tiempo de residencia en el equipo</li> </ul>	Indicador de humedad ubicado en el sistema de ductos	<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificar la humedad relativa del aire ambiente en donde se encuentre situado el secador</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo al indicador de humedad</li> <li>-Ajustar la Humedad relativa a las condiciones requeridas en el proceso de secado</li> </ul>
<b>MENOS</b>		Salida de aire	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El proceso de secado no es eficiente</li> <li>-Humedad relativa baja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El material a secar aún contiene humedad</li> <li>- Mayor flujo de aire caliente suministrado al sistema</li> <li>- Mayor tiempo de residencia en el equipo</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificar el adecuado funcionamiento del secador de bandejas</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo al indicador de humedad</li> <li>-Ajustar la Humedad relativa a las condiciones requeridas en el proceso de secado</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Temperatura	Secador de bandejas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falla en el regulador de potencia que permite controlar la temperatura del aire con las resistencias</li> <li>-Falta de control en el suministro de flujo de aire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Posible afectación al material que se desea secar debido a la alta temperatura del aire caliente</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>		<b>2C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Incorporar alarma por alta temperatura (TAH) según las condiciones preestablecidas de operación</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo al indicador de temperatura</li> </ul>

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

**Nota:** En la tabla se evidencia el HAZOP del secador. Algunas desviaciones fueron tomadas de [Jhon Antony Pabón Beltran, “PLANTEAMIENTO METODOLOGICO PARA EL DIAGNOSTICO DE LA PLANTA DE SECADO BAJO LAS CONDICIONES DE DISEÑO ESTABLECIDAS POR EL FABRICANTE,” Fundación Universidad de América, Bogotá D.C., 2019]

### 3.1.4 Extractor líquido- líquido y sólido-líquido

**Tabla 17.**

*HAZOP Planta De Extracción Sólido-Líquido y Líquido-Líquido – Nodo TK-101*

<b>Proyecto</b>	Planta De Extracción Sólido-Líquido y Líquido-Líquido				<b>P&amp;ID</b>	Figura 37	
<b>Nodo</b>	TK-101				<b>Fecha</b>	31/05/2022	
<b>Descripción del nodo</b>	Tanque del fluido calefactor (Aceite térmico)						
<b>Intención del nodo</b>	No sobrepasar el 70% de la capacidad de diseño						
<i>Desviación</i>		<i>paso/ etapa</i>	<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvaguardas</i>	<i>Valoración</i>	<i>Recomendaciones</i>
<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>						

<b>NO</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>-No se realiza carga del aceite térmico por parte del encargado</li> <li>- No se realiza recirculación del aceite térmico por parte del percolador y el concentrador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Baja eficiencia en el proceso de extracción en el percolador y concentrador del solvente</li> </ul>		<b>3A</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar supervisiones periódicas durante la carga de aceite térmico al tanque</li> <li>- Verifica el proceso de recirculación del aceite térmico</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Flujo	Entrada	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Se excede la carga del aceite térmico al tanque TK-101</li> <li>- No se controla el flujo de la corriente de recirculación del aceite térmico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Derrame del aceite térmico si se supera el volumen de diseño</li> <li>- Gasto energético mayor y sobrecalentamiento en el percolador y concentrador</li> </ul>	-Indicador de nivel situado en el tanque	<b>3B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar supervisiones periódicas durante la carga de aceite térmico al tanque</li> <li>-Abrir válvula de purga V-02 para regular el nivel del tanque</li> <li>- Implementar un indicador de flujo y/o válvula de control en la tubería referente a la recirculación del aceite</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Obstrucción en válvulas y tuberías de recirculación del aceite térmico</li> <li>-Ruptura o fuga en tubería</li> <li>- El flujo de la corriente de recirculación del aceite es bajo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Baja eficiencia en el proceso de extracción en el percolador y concentrador del solvente</li> <li>-Riesgo de sobrecalentamiento en el motor de la bomba de alimentación del aceite térmico y posible ruptura de eje</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación del percolador y concentrador</li> </ul>		<b>3B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar supervisiones periódicas durante la carga de aceite térmico al tanque</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga</li> <li>- Implementar un indicador de flujo en la tubería referente a la recirculación del aceite</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Nivel	Interior del tanque	-No se realiza regulación de nivel con las válvulas V-03/02	- Derrame del aceite por rebosar el volumen máximo (Pérdida por contención)	-Indicador de nivel situado en el tanque	<b>3C</b>	- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga

			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Acumulación del aceite por obstrucción en tubería o válvulas de control (en fondo) posición cerrada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inundación de equipos por rebose no diseñados para soportar líquido</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mantenimiento preventivo al sensor de nivel</li> <li>-Implementar alarmas por alto nivel (LAH)</li> <li>-Drenar aceite adicional abriendo las válvulas de purga del tanque de aceite (V-02/03), ya que el aceite se expande al aumentar la temperatura pudiendo causar un posible derrame</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Falla en el sensor de nivel</li> <li>-No se realiza regulación de nivel con las válvulas V-03/02</li> <li>- Obstrucción en válvulas de control (en fondo) posición abierta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Disminución del flujo de aceite que calienta el percolador y el concentrador</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> <li>-Cavitación del sistema de bombeo del aceite, conectado a los fondos del tanque</li> <li>- Baja eficiencia de operación en el percolador y concentrador</li> </ul>	-Válvulas de control de nivel	<b>2C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Implementar alarmas por bajo nivel (LAL)</li> <li>-Mantenimiento preventivo al sensor de nivel</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga</li> <li>- Adicionar la cantidad requerida de aceite térmico que tenga las mismas propiedades recomendadas por el fabricante</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Presión	Interior del tanque	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Venteo inadecuado del aire durante el llenado</li> <li>- Falla en la válvula de alivio V-01 (Conexión presión atmosférica)</li> <li>- Aumento repentino de la presión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sobrepresión en el tanque generando pérdida de contención, ruptura de los sellos y ruptura de tuberías</li> <li>- Mayor desgaste en el equipo</li> </ul>	- Indicador de presión situado en la tubería	<b>4B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar indicador de presión en el tanque</li> <li>-Mantenimiento preventivo al indicador de nivel</li> </ul>

			- Aumento significativo del nivel y/o temperatura en el tanque	-Variación de las condiciones óptimas de operación			- Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvula de alivio
<b>MENOS</b>			- Disminución repentina de la presión  - Bloqueo de bombas o líneas de succión  - Bloqueo de venteo durante el vaciado	-Cavitación del sistema de bombeo de aceite térmico, conectado a los fondos del tanque  - Riesgo de implosión en el tanque  -Variación de las condiciones óptimas de operación	- Válvula de alivio de presión V-01	<b>2A</b>	- Implementar indicador de presión en el tanque  -Verificación de flujos de entrada y salida en el tanque  - Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvula de alivio
<b>MÁS</b>	Temperatura	Interior del tanque	- Sobre calentamiento por parte de las resistencias del sistema	- Gasto energético mayor y sobre calentamiento en el percolador y concentrador - Mayor desgaste en el equipo -Variación de las condiciones óptimas de operación -Pérdida por contención si el nivel esta fuera de los limites ya que el aceite se expande con el aumento de temperatura	- Indicador de temperatura situado en el tanque - Alarma por alta temperatura	<b>3C</b>	- Verificación del adecuado funcionamiento y mantenimiento a las resistencias del sistema de calentamiento de aceite  - Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura  -Implementar alarmas por alto nivel (LAH) y realizar mantenimiento al sensor de nivel ubicado en el tanque
<b>MENOS</b>			- Falla en el indicador de temperatura  - Falla en el sistema de resistencias del tanque	-Baja eficiencia en el proceso de extracción en el percolador y concentrador del solvente -Variación de las condiciones óptimas de operación - Sobresfuerzo de la bomba debido a una		<b>2B</b>	- Verificación del adecuado funcionamiento y mantenimiento a las resistencias del sistema de calentamiento de aceite  - Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura

				mayor viscosidad del aceite térmico		
--	--	--	--	-------------------------------------	--	--

**Nota:** En la tabla se evidencia el HAZOP del extractor líquido-líquido y sólido-líquido.

**Tabla 18.**

*HAZOP Planta De Extracción Sólido-Líquido y Líquido-Líquido – Nodo Percolador*

<b>Proyecto</b>		Planta De Extracción Sólido-Líquido y Líquido-Líquido				<b>P&amp;ID</b>	Figura 37
<b>Nodo</b>		Percolador				<b>Fecha</b>	13/06/2022
<b>Descripción del nodo</b>		Percolador modo de operación sólido - líquido/ líquido-líquido					
<b>Intención del nodo</b>		Límite a las condiciones requeridas del proceso sin afectaciones a la integridad de la planta de extracción					
<i>Desviación</i>		<i>paso/ etapa</i>	<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvaguardas</i>	<i>Valoración</i>	<i>Recomendaciones</i>
<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>						
NO	Flujo	Alimentación de solvente y Recirculación	- No se realizó la carga de solvente de extracción en el equipo	- Sobre calentamiento del motor acoplado al agitador  -Derrame de solvente que puede ser altamente inflamable exponiendo al personal	-Válvula de control se alimentación V-13	3A	- Implementar indicadores de flujos a la entrada y salida del flujo en el percolador  - Implementar indicadores de flujos a la entrada y salida del flujo en el percolador (alimentación, descarga y recirculación)
			-No se realiza el cálculo adecuado de la proporción de solvente/sólido -Falta de restricción en la regulación de la válvula V-13 - El flujo de la corriente de recirculación del	- Mayor gasto energético en el concentrador  - Derrame de solvente (inflamable) posible pérdida por contención en el equipo			- Válvula de control de

			solvente es alto (no hay regulación en V-24)		recirculación V-24		antes de realizar la carga de solvente
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Apertura de válvulas V-08/11/23</li> <li>-Obstrucción en válvulas de alimentación y recirculación V-13/24 (Material particulado)</li> <li>-Ruptura o fuga en tubería</li> <li>- El flujo de la corriente de recirculación del solvente es bajo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja eficiencia en el proceso de extracción</li> <li>-Falla en la condensación en el proceso de recirculación de solvente (Concentrador y/o intercambiador de calor)</li> <li>-Posible derrame de solvente en estado líquido o vapor (Si hay escape)</li> </ul>		<b>3B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar supervisiones periódicas durante la carga del solvente al percolador</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga, descarga y recirculación</li> <li>-Verificar que las válvulas al percolador estén cerradas</li> <li>- Implementar un indicador de flujo en la tubería referente a la recirculación y alimentación del solvente</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Nivel	Interior del percolador	<ul style="list-style-type: none"> <li>-No se realiza regulación de nivel con las válvulas V-13/V-08</li> <li>-Acumulación del solvente por obstrucción en tubería (Material particulado) o válvulas de control (en fondo) posición cerrada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Derrame del solvente (inflamable) por rebosar el volumen máximo de diseño</li> <li>- Inundación de equipos por rebose no diseñados para soportar líquido</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación en el proceso de extracción</li> </ul>	-Válvulas de control de nivel (V-13/08)	<b>3C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar un indicador de nivel en el percolador</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga. - Verificar que el material particulado en la extracción se encuentre con un diámetro de partícula entre 0.5-4 mm</li> </ul>
<b>MENOS</b>			-No se realiza regulación de nivel con las válvulas V-13/V-08	-Variación de las condiciones óptimas de operación (Baja eficiencia en el proceso de extracción)		<b>2C</b>	- Implementar un indicador de nivel en el percolador

			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Ruptura o fuga en tubería, generando pérdida de solvente en el interior</li> <li>- Válvula de purga (V-08) se encuentra totalmente abierta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El tanque puede quedar totalmente vacío quedándose sin fase líquida, afectando los conductos y equipos que no están diseñados para el funcionamiento en seco.</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga. - Verificar que el material particulado en la extracción se encuentre con un diámetro de partícula entre 0.5-4 mm</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Presión	Interior del percolador	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falla en la válvula de alivio V-07</li> <li>- Aumento repentino de la presión en el tanque percolador</li> <li>- Aumento significativo del nivel y/o temperatura en el tanque (Expansion del solvente de extracción)</li> <li>- Falla en el indicador de presión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sobrepresión en el tanque generando pérdida de contención, ruptura de los sellos y ruptura de tuberías</li> <li>- Variación en la temperatura de ebullición del solvente de extracción</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación (baja eficiencia)</li> </ul>	- Válvula de alivio (V-07)	<b>4B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvula de alivio</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disminución repentina de la presión en el tanque</li> <li>- Falla en el indicador de presión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Riesgo de implosión en el tanque</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar un indicador de presión en el percolador</li> <li>- Verificar las condiciones de saturación del solvente</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disminución repentina de la presión en el tanque</li> <li>- Falla en el indicador de presión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Riesgo de implosión en el tanque</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>		<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar un indicador de presión en el percolador</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Temperatura	Interior del percolador	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El aceite térmico de calentamiento excede su temperatura</li> <li>- Aumento de temperatura repentino debido a la naturaleza del solvente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Afectación en el proceso de extracción sólido-líquido en el percolador</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> <li>- Mayor desgaste en el equipo</li> </ul>	-Indicador de temperatura situado en el percolador	<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Implementar alarmas por alta temperatura (TAH) y realizar mantenimiento al sensor de temperatura ubicado en el tanque</li> <li>- Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura</li> </ul>

				- Gasto energético mayor debida a la elevada temperatura del aceite térmico.			- Verificar el indicador de temperatura ubicado en el tanque de aceite térmico
<b>MENOS</b>			- El aceite térmico de calentamiento está 20°C por debajo de la temperatura de ebullición del solvente.	- Afectación en la transferencia de masa del soluto hacia el solvente		<b>2B</b>	- Implementar alarmas por baja temperatura (TAL)
			- Temperatura ambiente baja  - Disminución de temperatura repentina debido a la naturaleza del solvente	- Baja solubilidad del soluto en el solvente (baja eficiencia de extracción)  - Mayor desgaste en el equipo  - Variación de las condiciones óptimas de operación			- Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura  - Verificar el indicador de temperatura ubicado en el tanque de aceite térmico
<b>MAYOR</b>	Tamaño de partícula Sólido (Aplica sólo para el modo de extracción sólido-líquido) <i>Entre 0.5-4 mm</i>	Carga en la Canastilla del percolador		- Baja eficiencia en el proceso de extracción sólido líquido		<b>1B</b>	- Reducción de tamaño de partícula al especificado en el proceso y ficha técnica en el equipo
<b>MENOR</b>			- Falla en el proceso de molienda del material sin seguir las especificaciones permitidas en el proceso	- Baja eficiencia en el proceso de extracción sólido-líquido - Taponamiento en tubería y válvulas por traspaso de material particulado a través de la malla de la canastilla	-----	<b>2D</b>	- Si el tamaño de partícula del sólido es menor que el de la malla de la canastilla, envolver el sólido en un medio filtrante (media velada, tela, etc.)

**Nota:** En la tabla se evidencia el HAZOP del extractor líquido-líquido y sólido-líquido.

**Tabla 19.**

HAZOP Planta De Extracción Sólido-Líquido y Líquido-Líquido – Nodo Concentrador

<b>Proyecto</b>	Planta De Extracción Sólido-Líquido y Líquido-Líquido						<b>P&amp;ID</b>	Figura 37
<b>Nodo</b>	Concentrador						<b>Fecha</b>	13/06/2022
<b>Descripción del nodo</b>	Concentrador de extracto							
<b>Intención del nodo</b>	Límite a las condiciones requeridas del proceso sin afectaciones a la integridad de la planta de extracción							
<i>Desviación</i>		<i>paso/ etapa</i>	<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvaguardas</i>	<i>Valoración</i>	<i>Recomendaciones</i>	
<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>							
NO	Flujo	Entrada	- No hay flujo de entrada de soluto y solvente en el percolador  - La válvula V-09 se encuentra cerrada  - Se presenta obstrucción en la válvula V-12  - Se presentan fallas en el percolador	- No es posible concentrar el líquido de interés que sale del percolador  - Acumulación de solvente en el tanque percolador ya que no se puede evaporar y recircular	-Indicador de nivel situado en el tanque	3A	- Verificar que se realice la carga de soluto en el percolador e ingrese el solvente por la válvula V-24 - Revisar que la válvula V-09 este abierta, al igual que la válvula V-12 - Realizar mantenimiento/limpieza en tubería y válvulas descarga y descarga - Verificar el adecuado funcionamiento del percolador	
			- No se controla el flujo de la corriente de recirculación del solvente  - Se excede el flujo de solvente y cantidad de soluto en el percolador	-Derrame del líquido de interés en el concentrador si se supera el volumen de diseño  - Gasto energético mayor y			3B	- Verificar que se realice la carga de soluto y solvente en la proporción adecuada  - Implementar un indicador de flujo en la tubería referente a la recirculación del solvente

				sobrecalentamiento en el concentrador			- Abrir las válvulas V-17 y la válvula de purga V-18
<b>MENOS</b>			- Apertura de las válvulas V-17/18	- Baja eficiencia en el proceso de concentrar el líquido de interés que sale del percolador		<b>2B</b>	- Realizar mantenimiento/limpieza en tubería y válvulas descarga y descarga
			- Se presenta obstrucción en válvulas y tuberías de recirculación del solvente	- Baja obtención del solvente para realizar la recirculación			- Verificar el adecuado funcionamiento del percolador
			- Ruptura o fuga en la tubería				- Implementar un indicador de flujo a la salida del percolador
			- Se presentan fallas en el percolador				
<b>MÁS</b>	Nivel	Interior del tanque concentrador	- Se excede el flujo de solvente y cantidad de soluto en el percolador	-Derrame del líquido de interés en el concentrador si se supera el volumen de diseño	-Indicador de nivel situado en el tanque	<b>3C</b>	- Verificar que se realice la carga de soluto y solvente en la proporción adecuada
			- Obstrucción en la tubería de descarga o las válvulas V-17/18	- Inundación de equipos por rebose no diseñados para soportar líquido			- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga
				- Gasto energético mayor y sobrecalentamiento en el concentrador			-Mantenimiento preventivo al indicador de nivel
							-Implementar alarmas por alto nivel (LAH)
<b>MENOS</b>			- Apertura de las válvulas V-17/18	- Baja eficiencia en el proceso de concentrar el	-Válvulas de control de nivel	<b>2C</b>	- Verificar el adecuado funcionamiento del percolador

			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se presentan fallas en el percolador</li> </ul>	<p>líquido de interés que sale del percolador</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- No es posible obtener suficiente solvente para realizar la recirculación</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificar el cierre de las válvulas V-17/18 durante el proceso de concentración</li> <li>-Mantenimiento preventivo al indicador de nivel</li> <li>-Implementar alarmas por bajo nivel (LAL)</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Presión	Interior del tanque concentrador	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falla en la válvula de alivio V-16</li> <li>- Aumento repentino de la presión en el tanque concentrador</li> <li>- Aumento significativo del nivel y/o temperatura en el tanque</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sobrepresión en el tanque generando pérdida de contención, ruptura de los sellos y ruptura de tuberías</li> <li>- Mayor desgaste en el equipo</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>	-Indicador de presión situado en el tanque	<b>4B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvula de alivio</li> </ul>
							<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mantenimiento preventivo al indicador de presión</li> <li>-Mantenimiento preventivo al indicador de nivel</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disminución repentina de la presión en el tanque</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Riesgo de implosión en el tanque</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>	-Válvula de alivio	<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mantenimiento preventivo al indicador de presión</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Temperatura	Interior del tanque concentrador	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El aceite térmico de calentamiento excede su temperatura</li> <li>- Temperatura ambiente alta</li> <li>- Aumento de temperatura repentino</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Afectación en la concentración del líquido de interés que sale del percolador</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> <li>- Mayor desgaste en el equipo</li> </ul>	-Indicador de temperatura situado en el tanque	<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Implementar alarmas por alta temperatura (TAH) y realizar mantenimiento al sensor de temperatura ubicado en el tanque</li> <li>- Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura</li> </ul>

			debido a la naturaleza del solvente	- Gasto energético mayor debido a la elevada temperatura del aceite térmico			- Verificar el indicador de temperatura ubicado en el tanque de aceite térmico
<b>MENOS</b>			- El aceite térmico de calentamiento se encuentra por debajo de la temperatura óptima	- Afectación en la concentración del líquido de interés que sale del percolador		<b>2B</b>	- Implementar alarmas por baja temperatura (TAL) y realizar mantenimiento al sensor de nivel ubicado en el tanque
			- Temperatura ambiente baja - Disminución de temperatura repentina debido a la naturaleza del solvente	- Variación de las condiciones óptimas de operación - Mayor desgaste en el equipo			- Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura - Verificar el indicador de temperatura ubicado en el tanque de aceite térmico
<b>MENOS</b>	Concentración	Salida del tanque	- La temperatura del tanque es baja y no permite la evaporación del solvente - Se presentan fallas en el percolador - El solvente utilizado en el proceso no es el adecuado	- Baja eficiencia en el proceso de concentrar el líquido de interés que sale del percolador	- Verificación manual de la concentración al extraer el líquido de interés por la válvula V-17	<b>1C</b>	- Realizar verificación de la temperatura del tanque - Analizar la naturaleza del soluto para determinar que solvente es el adecuado - Verificar el adecuado funcionamiento del percolador

**Nota:** En la tabla se evidencia el HAZOP del extractor líquido-líquido y sólido-líquido.

**Tabla 20.**

HAZOP Planta De Extracción Sólido-Líquido y Líquido-Líquido – Nodo TK-102 y TK-103

<b>Proyecto</b>		Planta De Extracción Sólido-Líquido y Líquido-Líquido				<b>P&amp;ID</b>	Figura 37
<b>Nodo</b>		TK-102/103				<b>Fecha</b>	13/06/2022
<b>Descripción del nodo</b>		Linea intercambiador de calor HE-101 - Tanques colectores de solvente ( No superar el 80% del volumen)					
<b>Intención del nodo</b>		Límite a las condiciones requeridas del proceso sin afectaciones a la integridad de la planta de extracción					
<i>Desviación</i>		<i>paso/ etapa</i>	<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvaguardas</i>	<i>Valoración</i>	<i>Recomendaciones</i>
<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>						
<b>NO</b>	Flujo	Entrada	- Se presentan fallas en el tanque concentrador	-No es posible recircular el solvente al percolador	Indicador de nivel situado en el tanque	<b>3A</b>	- Realizar verificación del adecuado funcionamiento del concentrador
			- No se condensa el solvente recuperado en el tanque concentrador	- Sobre calentamiento del intercambiador de calor y mayor desgaste en el equipo			- Verificar que las válvulas de alimentación a los tanques (V-25/29/33) estén abiertas
			- Cierre de las válvulas V-25/29/33	- Afectación en la trampa de vacío y la bomba de vacío			- Verificar que el condensador de solvente opere adecuadamente
<b>MÁS</b>	Flujo	Entrada	- Se excede la carga del solvente en el percolador y posteriormente en el concentrador	-Derrame del solvente si se supera el volumen de diseño	Indicador de nivel situado en el tanque	<b>3B</b>	-Realizar supervisiones periódicas durante la carga del solvente en el percolador
			- No se controla el flujo de la corriente de recirculación del solvente recuperado	- Sobre presión en la tubería debido al flujo excesivo en su interior			- Implementar un indicador de flujo en la tubería referente a la recirculación del solvente
- Se presentan fallas en el sistema de vacío	- Afectación en el proceso de extracción por exceso de solvente	- Verificar el adecuado funcionamiento del sistema de vacío					
<b>MENOS</b>	Flujo	Entrada	-Apertura de válvulas V-28/32	-Alimentación insuficiente de solvente al percolador	Indicador de nivel situado en el tanque	<b>2B</b>	-Verificar que las válvulas de descarga estén cerradas (V-28/32)

			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Obstrucción en válvulas de alimentación V-25/29/33</li> <li>-Ruptura o fuga en tubería</li> <li>- El flujo de la corriente de recirculación del solvente es bajo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja eficiencia de extracción</li> <li>- Sobre calentamiento del intercambiador de calor y mayor desgaste en el equipo</li> <li>- Afectación en la trampa de vacío y la bomba de vacío</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga</li> <li>-Realizar supervisiones periódicas durante la carga del solvente en el percolador</li> <li>- Implementar un indicador de flujo en la tubería referente a la recirculación del solvente</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Nivel	Interior de los tanques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se excede el flujo de condensado que sale del concentrador y luego del condensador</li> <li>- Se presentan fallas en el indicador de nivel del tanque</li> <li>- Obstrucción en la tubería de descarga o las válvulas V-28/32</li> <li>- Falla en el visor de condensación (la mezcla entra parcialmente vaporizada)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Derrame de solvente inflamable si se supera el volumen de diseño</li> <li>- Inundación de equipos por rebose no diseñados para soportar líquido</li> <li>- Puede presentarse sobrepresión en el tanque si el solvente no se encuentra totalmente condensado</li> </ul>	Indicador de nivel situado en el tanque	<b>3C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Verificar que la condensación de solvente sea completa (verificar visor de condensación)</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga</li> <li>-Mantenimiento preventivo al indicador de nivel</li> <li>-Implementar alarmas por alto nivel (LAH)</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Apertura de las válvulas V-26/28/32</li> <li>- Se presentan fallas en el concentrador y condensador</li> <li>- Se presentan fallas en el indicador de nivel del tanque</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pérdidas significativas en la eficiencia del percolador al no presentar recirculación de solvente condensado</li> <li>- No es posible obtener suficiente solvente para almacenar y/o realizar la recirculación</li> </ul>	Válvulas de control de nivel	<b>2C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Verificar que la condensación de solvente sea completa (verificar visor de condensación)</li> <li>- Verificar el cierre de las válvulas V-26/28/32 durante el proceso de concentración</li> <li>-Mantenimiento preventivo al indicador de nivel</li> <li>-Implementar alarmas por bajo nivel (LAL)</li> </ul>

<b>MÁS</b>	Presión	Interior de los tanques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falla en el sistema de vacío</li> <li>- Aumento significativo del nivel y/o temperatura en el tanque</li> <li>- Sobrepresión del condensador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sobrepresión en el tanque generando pérdida de contención, ruptura de los sellos y ruptura de tuberías</li> <li>- Mayor desgaste en el equipo</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>	Válvula de alivio	<b>4B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvula de alivio</li> <li>- Verificar el funcionamiento adecuado del sistema de vacío</li> <li>- Implementar en el tanque un indicador de presión</li> <li>- verificar la presión y temperatura del solvente condensado</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disminución repentina de la presión en el tanque</li> <li>- Falla en el sistema de vacío</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Riesgo de implosión en el tanque</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>		<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar en el tanque un indicador de presión</li> <li>- Verificar el funcionamiento adecuado del sistema de vacío</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Temperatura	Interior del tanque	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falla en el condensador (menor suministro de agua de enfriamiento)</li> <li>- Falla en el visor de condensación (la mezcla entra parcialmente vaporizada)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Problemas significativos en el proceso de recirculación</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>	- Indicador de temperatura situado en el tanque	<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH)</li> <li>-Verificar que la condensación de solvente sea completa (verificar visor de condensación)</li> <li>- Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura ambiente baja</li> <li>- Disminución de temperatura repentino debido a la naturaleza del reactivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Riesgo de fragilización del material de construcción del tanque</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas el proceso de recirculación de solvente al percolador</li> </ul>		<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por baja temperatura (TAL)</li> <li>-Verificar que la condensación de solvente sea completa (verificar visor de condensación)</li> <li>- Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura</li> </ul>

<b>MENOS</b>	Composición	- Se presentan fallas en el condensador y/o visor de condensación	- Problemas en la eficiencia de extracción ya que el solvente no se recircula condensado	Válvulas de apertura y cierre de suministro	<b>1C</b>	- Implementar indicador de flujo en la corriente del condensador, realizar supervisión a la composición del condensado
--------------	-------------	---	--	---	-----------	--

**Nota:** En la tabla se evidencia el HAZOP del extractor líquido-líquido y sólido-líquido.

### 3.2 Centro de transformación y adecuación (CETA)

#### 3.2.1 Banco de reactores

**Tabla 21.**

*HAZOP Banco de reactores – Nodo CSTR*

<b>Proyecto</b>	Banco de reactores		*R1- Reactivo 1				
<b>Nodo</b>	Reactores CSTR		*R2- Reactivo 2			<b>P&amp;ID</b>	Figura 44
<b>Descripción del nodo</b>	Reactores R-101/102/103 (1L) y Reactor R-104 (3L)					<b>Fecha</b>	31/05/2022
<b>Intención del nodo</b>	Límite a las condiciones requeridas del proceso sin afectaciones a la integridad del banco de reactores						
<i>Desviación</i>		<i>paso/ etapa</i>	<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvaguardas</i>	<i>Valoración</i>	<i>Recomendaciones</i>
<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>						
<b>NO</b>	Flujo	Entrada de reactivos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los tanques de alimentación TK-101 y TK-102 se encuentran vacíos</li> <li>- Las válvulas V-15/16/17 (R1) y V-45/46/47 (R2) se encuentran cerradas</li> <li>- Ruptura o bloqueo por obstrucción en el sistema de tubería de alimentación al reactor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No hay alimento en la entrada del reactor</li> <li>- No se puede llevar a cabo la operación en el equipo</li> <li>- Exceso de calor en el equipo y desgaste del mismo al circular aceite térmico calefactor sin reactantes en el interior</li> </ul>	Indicador de nivel situado en el reactor	<b>3A</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar supervisiones periódicas durante la carga de reactivos en los tanques de almacenamiento</li> <li>- Verificar que las válvulas V-15/16/17 y V-45/46/47 se encuentran abiertas</li> <li>- Realizar mantenimiento y limpieza en la tubería de alimentación</li> </ul>

			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falla en las bombas dosificadoras de alimentación P-101 (R1) y P-102 (R2)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No se presenta formación de productos en el reactor</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar indicadores de flujo en los tramos de alimentación al reactor</li> </ul>
<b>MÁS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se excede la carga de reactivos en los tanques de alimentación TK-101 y TK-102</li> <li>- Aumento en la presión de los tanques de alimento y falta de control en el flujo a la salida de los mismos</li> <li>- Aumento en la presión de descarga en las bombas dosificadoras de alimentación P-101 (R1) y P-102 (R2)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sobre flujo de reactivos en interior del reactor</li> <li>-Derrame del reactivo de alimentación si se supera el volumen de diseño</li> <li>- Afectación en la operación del reactor y obtención del producto de interés</li> </ul>		<b>3B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar supervisiones periódicas durante la carga de reactivos en los tanques de almacenamiento</li> <li>- Verificar el indicador de presión en los tanques de alimentación</li> <li>- Implementar indicadores de flujo en los tramos de alimentación al reactor</li> <li>- Regular la presión de descarga de las bombas dosificadoras P-101(R1) y P-102(R2)</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- La carga de reactivos en los tanques de alimentación TK-101 y TK-102 es baja</li> <li>- Ruptura o fuga en el sistema de tubería de alimentación al reactor</li> <li>- Falla en las bombas dosificadoras de alimentación P-101 (R1) y P-102 (R2)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falta de suministro de reactivos para llevar a cabo la reacción completa en el equipo</li> <li>- Disminución en la velocidad de reacción del proceso</li> <li>-Riesgo de sobrecalentamiento en el motor de la bomba de alimentación y posible ruptura de eje</li> </ul>		<b>3B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar supervisiones periódicas durante la carga de reactivos en los tanques de almacenamiento</li> <li>- Realizar mantenimiento y limpieza en la tubería de alimentación</li> <li>- Implementar indicadores de flujo en los tramos de alimentación al reactor</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Nivel	Interior del reactor	-No se realiza regulación de nivel con las válvulas V-063/68/73/78	- Derrame de reactivo por rebosar el volumen máximo	-Indicador de nivel situado en el tanque	<b>3C</b>	- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga

			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Acumulación de reactivo por obstrucción en tubería o válvulas de control (en fondo) posición cerrada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inundación de equipos por rebose no diseñados para soportar líquido</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> <li>- Baja eficiencia en la mezcla del reactor (puntos muertos)</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mantenimiento preventivo al sensor de nivel</li> <li>-Implementar alarmas por alto nivel (LAH)</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>-No se realiza regulación de nivel con las válvulas de entrada V-15/16/17 (R1) y V-45/46/47 (R2)</li> <li>- Obstrucción en válvulas de control (en fondo) posición abierta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Posible sobrecalentamiento en el reactor (chaqueta) debido a la falta de reactivos en el equipo</li> <li>-Disminución del flujo del producto de interés</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>	-Válvulas de control de nivel	<b>2C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Implementar alarmas por bajo nivel (LAL)</li> <li>-Mantenimiento preventivo al sensor de nivel</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Temperatura	Interior del reactor	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El aceite térmico de calentamiento excede la temperatura de operación en el sistema</li> <li>- Aumento de temperatura repentino debido a la naturaleza del reactivo</li> <li>- Aumento de temperatura ambiente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Afectación en la velocidad de reacción del proceso</li> <li>- Aumento de la presión en el sistema</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> <li>- Mayor desgaste en el equipo, posible ruptura por operar por encima de las condiciones de operación</li> </ul>	Indicador de temperatura situado en el reactor	<b>3B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar mantenimiento al sensor de temperatura ubicado en el reactor</li> <li>- Mantenimiento preventivo del indicador de temperatura</li> <li>- Verificar la temperatura y flujo de aceite térmico empleado en la calefacción</li> </ul>

				- Mayor proporción de fase gaseosa en la salida			
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- El aceite térmico de calentamiento se encuentra por debajo de la temperatura óptima</li> <li>- Temperatura ambiente baja</li> <li>- Disminución de temperatura repentina debido a la naturaleza del solvente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disminución en la velocidad de reacción del proceso</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> <li>- Mayor desgaste en el equipo</li> <li>- Disminución en la conversión de la reacción</li> </ul>		<b>2C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Implementar alarmas por baja temperatura (TAL) y realizar mantenimiento al sensor de nivel ubicado en el tanque</li> <li>- Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura</li> <li>- Verificar el indicador de temperatura ubicado en el tanque de aceite térmico</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Presión	Interior del tanque	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falla en las válvulas de alivio V-061/67/72/77</li> <li>- La presión de descarga de las bombas dosificadoras P-101 (R1) y P-102 (R2) es alta</li> <li>- Aumento de temperatura en el reactor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sobrepresión en el tanque generando pérdida de contención, ruptura de los sellos y ruptura de tuberías</li> <li>- Mayor desgaste en el equipo</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>	Indicador de presión situado en la tubería	<b>4B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH)</li> <li>-Mantenimiento preventivo al indicador de nivel</li> <li>- Regular la presión de descarga de las bombas dosificadoras P-101(R1) y P-102(R2)</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvula de alivio</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disminución repentina de la presión</li> <li>- La presión de descarga de las bombas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Cavitación del sistema de bombeo de reactivo, conectado a los fondos del tanque</li> <li>- Riesgo de implosión en el tanque</li> </ul>	Válvulas de alivio de presión	<b>2C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por baja presión (PAL)</li> <li>-Mantenimiento preventivo al indicador de presión</li> </ul>

			<p>dosificadoras P-101 (R1) y P-102 (R2) es baja</p> <p>- Disminución de temperatura en el reactor</p>	<p>- Disminución en la conversión de la reacción</p> <p>-Variación de las condiciones óptimas de operación</p>			<p>- Regular la presión de descarga de las bombas dosificadoras P-101(R1) y P-102(R2)</p> <p>- Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvula de alivio</p>
<b>MENOS</b>	Velocidad	Agitador	<p>- Falla en el suministro eléctrico</p> <p>- Avería en el sistema de agitación</p> <p>- Los reactivos tienen una alta viscosidad</p>	<p>- La mezcla en el interior del reactor no es perfecta</p> <p>- Disminución en la conversión de la reacción</p>	Motoreductor	<b>1B</b>	<p>- Realizar revisiones rutinarias del sistema de agitación</p> <p>- Mantenimiento preventivo al sistema de agitación</p> <p>- Analizar las propiedades de los reactivos</p>
<b>MÁS</b>			<p>- Falla en el suministro eléctrico</p> <p>- Avería en el sistema de agitación</p>	<p>- Exceso de mezclado en el interior del reactor</p> <p>-Variación de las condiciones óptimas de operación</p>			<p>- Realizar revisiones rutinarias del sistema de agitación</p> <p>- Mantenimiento preventivo al sistema de agitación</p>
<b>NO</b>	Reacción	Interior del reactor	<p>- Los tanques de alimentación TK-101 y TK-102 se encuentran vacíos</p> <p>- Ruptura o bloqueo por obstrucción en el sistema de tubería de alimentación al reactor</p> <p>-Condiciones de alimentación desfavorables para la reacción (fuera de las óptimas)</p>	<p>- No hay producción de compuestos de interés</p> <p>- Acumulación de componentes sin reaccionar</p> <p>- Disminución del potencial económico del compuesto de interés (Si la práctica se realiza para externos)</p>	Operar a las condiciones de reacción	<b>3A</b>	<p>-Realizar supervisiones periódicas durante la carga de reactivos en los tanques de almacenamiento</p> <p>- Realizar mantenimiento/limpieza en la tubería o realizar algún cambio si se requiere</p> <p>- Implementar indicadores de flujo en los tramos de alimentación al reactor</p>

<b>MÁS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento considerable de la presión de los corrientes de entrada en el reactor</li> <li>- El flujo de alimentación de alguno de los dos reactantes es demasiado alto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sobre flujo de reactivos en interior del reactor (Posible rebosamiento)</li> <li>-Derrame del reactivo por pérdida de contención (Riesgo de ignición si el vapor es inflamable)</li> <li>- Afectación en la operación del reactor y obtención del producto de interés.</li> </ul>	<b>3B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar indicadores de flujo en los tramos de alimentación al reactor</li> <li>- Regular el flujo de las válvulas de suministro de reactivo V-15/16/17 y V-45/46/47</li> <li>- Verificar el indicador de presión en los tanques de alimentación</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Condiciones de alimentación desfavorables para la reacción (fuera de las óptimas)</li> <li>- Ruptura o fuga en el sistema de tubería de alimentación al reactor</li> <li>-Temperatura de operación demasiado baja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falta de suministro de reactivos para llevar a cabo la reacción completa en el equipo</li> <li>- Disminución en la velocidad de reacción del proceso</li> <li>-Acumulación de componentes sin reaccionar, lo que conduce a una menor calidad del producto</li> </ul>	<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar supervisiones periódicas durante la carga de reactivos en los tanques de almacenamiento</li> <li>- Realizar mantenimiento y limpieza en la tubería de alimentación</li> <li>- Implementar indicadores de flujo en los tramos de alimentación al reactor</li> <li>- Regular el flujo de las válvulas de suministro de reactivo V-15/16/17 y V-45/46/47</li> </ul>
<b>COMPOSICIÓN</b>	Otro	Composición por debajo de la deseada	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bloqueo u obstrucción en el sistema de tubería de alimentación al reactor</li> <li>- Falla en las bombas dosificadoras de alimentación P-101 (R1) y P-102 (R2)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mayor formación de subproductos</li> <li>- Disminución en la calidad del producto obtenido</li> </ul>	<b>1C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar monitoreo de los flujos de alimentación de los reactantes al reactor</li> <li>- Inspeccionar el alimento en busca de contaminación, en el caso de impurezas,</li> </ul>

			- Contaminación del alimento	- Disminución en la velocidad de reacción del proceso			detenga la producción y reemplazar y limpiar
--	--	--	------------------------------	---	--	--	--

**Nota:** En la tabla se evidencia el HAZOP del banco de reactores. Algunas desviaciones fueron tomadas de [Vikneswara Jayamaran, Anna Lvova, Qian Ying Ooi, Jia Wei Chong, and Yousra Hassan, “Hazard and Operability Study (HAZOP) Safety Assessment on Formaldehyde Production Plant,” 2002], [Rafael Bosh, “Planta de producción de HCOOH - Seguridad e higiene,” AFOR - Universidad autónoma de Barcelona, 2016]

**Tabla 22.**

*HAZOP Banco de reactores – Nodo PFR*

<b>Proyecto</b>	Banco de reactores		*R1- Reactivo 1				
<b>Nodo</b>	Reactor PFR		*R2- Reactivo 2		<b>P&amp;ID</b>	Figura 44	
<b>Descripción del nodo</b>	Reactores R-105/106/107 (1L) y Reactor R-108 (3L)				<b>Fecha</b>	31/05/2022	
<b>Intención del nodo</b>	Límite a las condiciones requeridas del proceso sin afectaciones a la integridad del banco de reactores						
<i>Desviación</i>		<i>paso/ etapa</i>	<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvaguardas</i>	<i>Valoración</i>	<i>Recomendaciones</i>
<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>						
NO	Flujo	Entrada Reactivos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los tanques de alimentación TK-101 y TK-102 se encuentran vacíos</li> <li>- Las válvulas de conducto de reactivo V-024 (R1) / V-054 (R2) y de ingreso a los equipos V-114/094/104/085 Se encuentran cerradas</li> <li>- Ruptura o bloqueo por obstrucción en el sistema de tubería de alimentación al reactor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No hay alimento en la entrada del reactor</li> <li>- No se puede llevar a cabo la reacción en el equipo sin suministro de reactantes</li> <li>- Exceso de calor en el equipo y desgaste del mismo al circular aceite térmico calefactor sin reactantes en el interior</li> </ul>	Válvulas de control en el sistema de alimentación	3A	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar supervisiones periódicas durante la carga de reactivos en los tanques de almacenamiento</li> <li>- Verificar que las válvulas de suministro de reactivo estén abiertas V-024 (R1) y V-054 (R2), junto con las válvulas de alimentación al equipo</li> <li>- Realizar mantenimiento/limpieza en la tubería o realizar algún cambio si se requiere</li> </ul>

				- No se presenta formación de productos en el reactor			- Implementar indicadores de flujo en los tramos de alimentación al reactor
<b>MÁS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- La presión de descarga de las bombas dosificadoras P-101 (R1) y P-102 (R2) es alta</li> <li>- Se excede la carga de reactivos en los tanques de alimentación TK-101 y TK-102</li> <li>- Aumento en la presión de los tanques de alimento y falta de control en el flujo a la salida de los mismos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sobre flujo de reactivos en interior del reactor (Posible rebosamiento)</li> <li>-Derrame del reactivo por pérdida de contención (Riesgo de ignición si el vapor es inflamable)</li> <li>- Afectación en la operación del reactor y obtención del producto de interés.</li> </ul>		<b>3B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Regular la presión de descarga de las bombas dosificadoras P-101(R1) y P-102(R2)</li> <li>- Implementar indicadores de flujo en los tramos de alimentación al reactor</li> <li>- Regular el flujo de las válvulas de suministro de reactivo V-024(R1), V-054(R2) y V-117</li> <li>- Verificar el indicador de presión en los tanques de alimentación</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- La carga de reactivos en los tanques de alimentación TK-101 y TK-102 es baja</li> <li>- Ruptura o fuga en el sistema de tubería de alimentación al reactor</li> <li>- Falla en las bombas dosificadoras de alimentación P-101 (R1) y P-102 (R2)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falta de suministro de reactivos para llevar a cabo la reacción completa en el equipo</li> <li>- Disminución en la velocidad de reacción del proceso</li> <li>-Riesgo de sobrecalentamiento en el motor de la bomba de alimentación y posible ruptura de eje</li> </ul>		<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar supervisiones periódicas durante la carga de reactivos en los tanques de almacenamiento</li> <li>- Realizar mantenimiento y limpieza en la tubería de alimentación</li> <li>- Implementar indicadores de flujo en los tramos de alimentación al reactor</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Temperatura	Interior del reactor	- El aceite térmico de calentamiento excede la temperatura de operación en el sistema	-Variación de las condiciones óptimas de operación	Indicador de temperatura situado en el reactor	<b>3B</b>	-Realizar mantenimiento al sensor de temperatura ubicado en el reactor

			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento de temperatura por la naturaleza de la reacción (Exotérmica)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor desgaste en el equipo, posible ruptura por operar por encima de las condiciones de operación</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mantenimiento preventivo del indicador de temperatura</li> <li>- Verificar la temperatura y flujo de aceite térmico empleado en la calefacción</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- El aceite térmico de calentamiento se encuentra por debajo de la temperatura óptima</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disminución en la velocidad de reacción y la tasa de producción</li> </ul>		<b>2C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por baja temperatura (TAL) y realizar mantenimiento al sensor de nivel ubicado en el tanque</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pérdida de temperatura si la reacción es endotérmica</li> <li>- Temperatura ambiente baja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura</li> <li>- Verificar el indicador de temperatura ubicado en el tanque de aceite térmico</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Presión	Interior del reactor	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La presión de descarga de las bombas dosificadoras P-101 (R1) y P-102 (R2) es alta</li> <li>- Temperatura alta en el reactor</li> <li>- Flujo alto de entrada de reactivos al reactor</li> <li>- Bloqueo o bloqueo parcial en la tubería de entrada y salida al reactor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sobrepresión en el tanque generando pérdida de contención, ruptura de los sellos y ruptura de tuberías</li> <li>- Peligro de incendio o explosión</li> <li>- Posibles derrames de reactantes calientes o inflamables (vapor confinado)</li> </ul>	Indicador de presión situado en la tubería	<b>4B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar Alarma por alta presión (PAH) y válvula de alivio en el reactor</li> <li>- Regular el flujo de las válvulas de suministro de reactivo V-024(R1), V-054(R2) y V-117</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvulas de alivio externas</li> <li>- Regular la presión de descarga de las bombas dosificadoras P-101(R1) y P-102(R2)</li> </ul>

<p><b>MENOS</b></p>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bloqueo u obstrucción en tubería de suministro de reactantes (R1) y (R2) desde los tanques de almacenamiento</li> <li>- Falla en las bombas dosificadoras de alimentación P-101 (R1) y P-102 (R2)</li> <li>- Válvulas de alivio abiertas en los tramos de tubería equipos</li> <li>- Falla en las bombas dosificadoras de alimentación P-101 (R1) y P-102 (R2)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Cavitación del sistema de bombeo de los tanques de reactivo</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>	<p>-Válvulas de alivio</p>	<p><b>2C</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar mantenimiento al indicador de presión, implementar alarma por baja presión (PAL)</li> <li>- Regular el flujo de las válvulas de suministro de reactivo V-024(R1), V-054(R2) y V-117</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvula de alivio</li> <li>- Regular la presión de descarga de las bombas dosificadoras P-101(R1) y P-102(R2)</li> </ul>
<p><b>NO</b></p>	<p>Reacción</p>	<p>Interior del reactor</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los tanques de alimentación TK-101 y TK-102 se encuentran vacíos</li> <li>- Desactivación del catalizador por no operar a las condiciones óptimas del proceso</li> <li>- Ruptura o bloqueo por obstrucción en el sistema de tubería de alimentación al reactor</li> <li>-Condiciones de alimentación desfavorables para la reacción (fuera de las óptimas)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No hay producción de Compuestos de interés</li> <li>- Acumulación de componentes sin reaccionar</li> <li>- Disminución del potencial económico del compuesto de interés (Si la práctica se realiza para externos)</li> </ul>	<p>Operar a las condiciones de reacción</p>	<p><b>3A</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar supervisiones periódicas durante la carga de reactivos en los tanques de almacenamiento</li> <li>- Verificar que las válvulas de suministro de reactivo estén abiertas V-024/127(R1) y V-054/169(R2)</li> <li>- Realizar mantenimiento/limpieza en la tubería o realizar algún cambio si se requiere</li> <li>- Implementar indicadores de flujo en los tramos de alimentación al reactor</li> </ul>

<b>MÁS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento considerable de la presión de las corrientes de entrada en el reactor</li> <li>- El flujo de alimentación de alguno de los dos reactantes es demasiado alto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sobre flujo de reactivos en interior del reactor (Posible rebosamiento)</li> <li>-Derrame del reactivo por pérdida de contención (Riesgo de ignición si el vapor es inflamable)</li> <li>- Afectación en la operación del reactor y obtención del producto de interés.</li> </ul>	<b>3B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Regular la presión de descarga de las bombas dosificadoras P-101(R1) y P-102(R2)</li> <li>- Implementar indicadores de flujo en los tramos de alimentación al reactor</li> <li>- Regular el flujo de las válvulas de suministro de reactivo V-024 (R1), V-054 (R2) y V-117</li> <li>- Verificar el indicador de presión en los tanques de alimentación</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Condiciones de alimentación desfavorables para la reacción (fuera de las óptimas)</li> <li>- Ruptura o fuga en el sistema de tubería de alimentación al reactor</li> <li>- Falla en las bombas dosificadoras de alimentación P-101 (R1) y P-102 (R2)</li> <li>-Temperatura de operación demasiado baja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falta de suministro de reactivos para llevar a cabo la reacción completa en el equipo</li> <li>- Disminución en la velocidad de reacción del proceso</li> <li>-Acumulación de componentes sin reaccionar, lo que conduce a una menor calidad del producto</li> </ul>	<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar supervisiones periódicas durante la carga de reactivos en los tanques de almacenamiento</li> <li>- Realizar mantenimiento y limpieza en la tubería de alimentación</li> <li>- Implementar indicadores de flujo en los tramos de alimentación al reactor</li> <li>- Regular el flujo de las válvulas de suministro de reactivo V-024/127(R1) y V-054/169(R2)</li> <li>- Regular la presión de descarga de las bombas dosificadoras P-101(R1) y P-102(R2)</li> </ul>

<b>COMPOSICIÓN</b>	Otro	Composición por debajo de la deseada	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bloqueo u obstrucción en el sistema de tubería de alimentación al reactor</li> <li>- Falla en las bombas dosificadoras de alimentación P-101 (R1) y P-102 (R2)</li> <li>- Contaminación del alimento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor formación de subproductos</li> <li>- Disminución en la calidad del producto obtenido</li> <li>- Disminución en la velocidad de reacción del proceso</li> </ul>	<b>1C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar monitoreo de los flujos de alimentación de los reactantes al reactor</li> <li>- Inspeccionar el alimento en busca de contaminación, en el caso de impurezas, detenga la producción y reemplazar y limpiar</li> </ul>
--------------------	------	--------------------------------------	--	---	-----------	--

**Nota:** En la tabla se evidencia el HAZOP del banco de reactores. Algunas desviaciones fueron tomadas de [Vikneswara Jayamaran, Anna Lvova, Qian Ying Ooi, Jia Wei Chong, and Yousra Hassan, “Hazard and Operability Study (HAZOP) Safety Assessment on Formaldehyde Production Plant,” 2002], [Rafael Bosh, “Planta de producción de HCOOH - Seguridad e higiene,” AFOR - Universidad autónoma de Barcelona, 2016]

**Tabla 23.**

*HAZOP Banco de reactores – Nodo PBR*

<b>Proyecto</b>	Banco de reactores		*R1- Reactivo 1				
<b>Nodo</b>	Reactor PBR (Reactor tubular de lecho fijo)		*R2- Reactivo 2	<b>P&amp;ID</b>	Figura 44		
<b>Descripción del nodo</b>	Reactor R-109 Capacidad 3L			<b>Fecha</b>	31/05/2022		
<b>Intención del nodo</b>	Límite a las condiciones requeridas del proceso sin afectaciones a la integridad del banco de reactores						
<i>Desviación</i>		<i>paso/ etapa</i>	<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvaguardas</i>	<i>Valoración</i>	<i>Recomendaciones</i>
<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>						
<b>NO</b>	Flujo	Entrada Reactivos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los tanques de alimentación TK-101 y TK-102 se encuentran vacíos</li> <li>- Las válvulas de conducto de reactivo V-024 (R1) / V-054 (R2) y de ingreso al</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No hay alimento en la entrada del reactor</li> <li>- No se puede llevar a cabo la reacción en el</li> </ul>	Válvulas de control en el sistema de alimentación	<b>3A</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar supervisiones periódicas durante la carga de reactivos en los tanques de almacenamiento</li> <li>- Verificar que las válvulas de suministro de reactivo estén abiertas V-</li> </ul>

		<p>equipo V-127 Se encuentran cerradas</p> <p>- Ruptura o bloqueo por obstrucción en el sistema de tubería de alimentación al reactor</p>	<p>equipo sin suministro de reactivos</p> <p>- Exceso de calor en el equipo y desgaste del mismo al circular aceite térmico calefactor sin reactivos en el interior</p> <p>- No se presenta formación de productos en el reactor</p>		<p>024/127(R1) y V-054/169(R2)</p> <p>- Realizar mantenimiento/limpieza en la tubería o realizar algún cambio si se requiere</p> <p>- Implementar indicadores de flujo en los tramos de alimentación al reactor</p>
<b>MÁS</b>		<p>- La presión de descarga de las bombas dosificadoras P-101 (R1) y P-102 (R2) es alta</p> <p>- Se excede la carga de reactivos en los tanques de alimentación TK-101 y TK-102</p> <p>- Aumento en la presión de los tanques de alimento y falta de control en el flujo a la salida de los mismos</p>	<p>- Sobre flujo de reactivos en interior del reactor (Posible rebosamiento)</p> <p>-Derrame del reactivo por pérdida de contención (Riesgo de ignición si el vapor es inflamable)</p> <p>- Afectación en la operación del reactor y obtención del producto de interés.</p>	<b>3B</b>	<p>- Regular la presión de descarga de las bombas dosificadoras P-101(R1) y P-102(R2)</p> <p>- Implementar indicadores de flujo en los tramos de alimentación al reactor</p> <p>- Regular el flujo de las válvulas de suministro de reactivo V-024(R1), V-054(R2) y V-117</p> <p>- Verificar el indicador de presión en los tanques de alimentación</p>
<b>MENOS</b>		<p>- La carga de reactivos en los tanques de alimentación TK-101 y TK-102 es baja</p> <p>- Ruptura o fuga en el sistema de tubería de alimentación al reactor</p> <p>- Falla en las bombas dosificadoras de</p>	<p>- Falta de suministro de reactivos para llevar a cabo la reacción completa en el equipo</p> <p>- Disminución en la velocidad de reacción del proceso</p> <p>-Riesgo de sobrecalentamiento en el motor de la bomba de</p>	<b>2B</b>	<p>-Realizar supervisiones periódicas durante la carga de reactivos en los tanques de almacenamiento</p> <p>- Realizar mantenimiento y limpieza en la tubería de alimentación</p> <p>- Implementar indicadores de flujo en los tramos de alimentación al reactor</p>

			alimentación P-101 (R1) y P-102 (R2)	alimentación y posible ruptura de eje			
<b>MÁS</b>	Temperatura	Interior del reactor	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El aceite térmico de calentamiento excede la temperatura de operación en el sistema</li> <li>- Falta de catalizador al interior del reactor</li> <li>- Aumento de temperatura por la naturaleza de la reacción (Exotérmica)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disminución en la velocidad de reacción del proceso por falta de catalizador</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> <li>- Mayor desgaste en el equipo, posible ruptura por operar por encima de las condiciones de operación</li> </ul>	Indicador de temperatura situado en el reactor	<b>3B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar mantenimiento al sensor de temperatura ubicado en el reactor</li> <li>- Mantenimiento preventivo del indicador de temperatura</li> <li>-Verificar la temperatura y flujo de aceite térmico empleado en la calefacción</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- El aceite térmico de calentamiento se encuentra por debajo de la temperatura óptima</li> <li>- Pérdida de temperatura si la reacción es endotérmica</li> <li>- Temperatura ambiente baja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disminución en la velocidad de reacción y la tasa de producción</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Implementar alarmas por baja temperatura (TAL) y realizar mantenimiento al sensor de nivel ubicado en el tanque</li> <li>- Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura</li> <li>- Verificar el indicador de temperatura ubicado en el tanque de aceite térmico</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Presión	Interior del reactor	- La presión de descarga de las bombas dosificadoras P-101 (R1) y P-102 (R2) es alta	-Sobrepresión en el tanque generando pérdida de contención,	- Indicador de presión situado en la tubería	<b>4B</b>	- Implementar Alarma por alta presión (PAH) y válvula de alivio en el reactor

			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura alta en el reactor</li> <li>- Flujo alto de entrada de reactivos al reactor</li> <li>- Bloqueo o bloqueo parcial en la tubería de entrada y salida al reactor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ruptura de los sellos y ruptura de tuberías</li> <li>- Peligro de incendio o explosión</li> <li>- Posibles derrames de reactantes calientes o inflamables (vapor confinado)</li> <li>-La acumulación de temperatura y presión conduce a la ruptura del recipiente</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Regular el flujo de las válvulas de suministro de reactivo V-024(R1), V-054(R2) y V-117</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvulas de alivio externas</li> <li>- Regular la presión de descarga de las bombas dosificadoras P-101(R1) y P-102(R2)</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bloqueo u obstrucción en tubería de suministro de reactantes (R1) y (R2) desde los tanques de almacenamiento</li> <li>- Falla en las bombas dosificadoras de alimentación P-101 (R1) y P-102 (R2)</li> <li>- Válvulas de alivio abiertas en los tramos de tubería equipos</li> <li>- Falla en las bombas dosificadoras de alimentación P-101 (R1) y P-102 (R2)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Cavitación del sistema de bombeo de los tanques de reactivo</li> <li>-Sinterización del catalizador, lo que conduce a una mayor caída de presión y una disminución del rendimiento</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>	-Válvulas de alivio	<b>2C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar mantenimiento al indicador de presión, implementar alarma por baja presión (PAL)</li> <li>- Regular el flujo de las válvulas de suministro de reactivo V-024(R1), V-054(R2) y V-117</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvula de alivio</li> <li>- Regular la presión de descarga de las bombas dosificadoras P-101(R1) y P-102(R2)</li> </ul>
<b>NO</b>	Reacción	Interior del reactor	- Los tanques de alimentación TK-101 y TK-102 se encuentran vacíos	- No hay producción de Compuestos de interés	Operar a las condiciones de reacción	<b>3A</b>	-Realizar supervisiones periódicas durante la carga de reactivos en los tanques de almacenamiento

		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Desactivación del catalizador por no operar a las condiciones óptimas del proceso</li> <li>- Ruptura o bloqueo por obstrucción en el sistema de tubería de alimentación al reactor</li> <li>- Condiciones de alimentación desfavorables para la reacción (fuera de las óptimas)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acumulación de componentes sin reaccionar</li> <li>- Disminución del potencial económico del compuesto de interés (Si la práctica se realiza para externos)</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Regular el flujo de las válvulas de suministro de reactivo V-024(R1), V-054(R2) y V-117</li> <li>- Realizar mantenimiento/limpieza en la tubería o realizar algún cambio si se requiere</li> <li>- Implementar indicadores de flujo en los tramos de alimentación al reactor</li> </ul>
<b>MÁS</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento considerable de la presión de los corrientes de entrada en el reactor</li> <li>- El flujo de alimentación de alguno de los dos reactantes es demasiado alto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sobre flujo de reactivos en interior del reactor (Posible rebosamiento)</li> <li>- Derrame del reactivo por pérdida de contención (Riesgo de ignición si el vapor es inflamable)</li> <li>- Afectación en la operación del reactor y obtención del producto de interés.</li> </ul>		<b>3B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Regular la presión de descarga de las bombas dosificadoras P-101(R1) y P-102(R2)</li> <li>- Implementar indicadores de flujo en los tramos de alimentación al reactor</li> <li>- Regular el flujo de las válvulas de suministro de reactivo V-024(R1), V-054(R2) y V-117</li> <li>- Verificar el indicador de presión en los tanques de alimentación</li> </ul>
<b>MENOS</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Condiciones de alimentación desfavorables para la reacción (fuera de las óptimas)</li> <li>- Ruptura o fuga en el sistema de tubería de alimentación al reactor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falta de suministro de reactivos para llevar a cabo la reacción completa en el equipo</li> <li>- Disminución en la velocidad de reacción del proceso</li> </ul>		<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar supervisiones periódicas durante la carga de reactivos en los tanques de almacenamiento</li> <li>- Realizar mantenimiento y limpieza en la tubería de alimentación</li> </ul>

			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falla en las bombas dosificadoras de alimentación P-101 (R1) y P-102 (R2)</li> <li>-Temperatura de operación demasiado baja</li> <li>- Desactivación del catalizador por no operar a las condiciones óptimas del proceso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Acumulación de componentes sin reaccionar, lo que conduce a una menor calidad del producto</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar indicadores de flujo en los tramos de alimentación al reactor</li> <li>- Regular el flujo de las válvulas de suministro de reactivo V-024(R1), V-054(R2) y V-117</li> <li>- Regular la presión de descarga de las bombas dosificadoras P-101(R1) y P-102(R2)</li> </ul>
<b>COMPOSICIÓN</b>	Otro	Composición por debajo de la deseada	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bloqueo u obstrucción en el sistema de tubería de alimentación al reactor</li> <li>- Falla en las bombas dosificadoras de alimentación P-101 (R1) y P-102 (R2)</li> <li>- Contaminación del alimento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mayor formación de subproductos</li> <li>- Disminución en la calidad del producto obtenido</li> <li>- Disminución en la velocidad de reacción del proceso</li> </ul>		<b>1C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar monitoreo de los flujos de alimentación de los reactantes al reactor</li> <li>Inspeccionar el alimento en busca de contaminación, en el caso de impurezas, detenga la producción y reemplazar y limpiar</li> </ul>

**Nota:** En la tabla se evidencia el HAZOP del banco de reactores. Algunas desviaciones fueron tomadas de [Vikneswara Jayamaran, Anna Lvova, Qian Ying Ooi, Jia Wei Chong, and Yousra Hassan, “Hazard and Operability Study (HAZOP) Safety Assessment on Formaldehyde Production Plant,” 2002], [Rafael Bosh, “Planta de producción de HCOOH - Seguridad e higiene,” AFOR - Universidad autónoma de Barcelona, 2016]

**Tabla 24.**

*HAZOP Banco de reactores – Nodo TK-101 y TK-102*

<b>Proyecto</b>	Banco de reactores		
<b>Nodo</b>	TK-101 y TK-102	<b>P&amp;ID</b>	Figura 44

**Descripción del nodo**  
**Intención del nodo**

Tanques de alimentación de reactivos

**Fecha** 31/05/2022

Límite a las condiciones requeridas del proceso sin afectaciones al tanque de almacenamiento

<i>Desviación</i>		<i>paso/ etapa</i>	<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvaviduas</i>	<i>Valoración</i>	<i>Recomendaciones</i>	
<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>							
<b>NO</b>	Flujo	Entrada	- No se realiza carga de los reactivos en los tanques TK-101 y TK-102 por parte del encargado  -Apertura de válvulas V-002/003 (TK-101) y V-032/033 (TK-102)	- Imposibilidad en la operación del reactor debido a falta de reactivo de alimentación  -Riesgo de sobrecalentamiento en el motor de la bomba de alimentación y posible ruptura de eje	Indicador de nivel situado en el tanque	<b>3A</b>	-Realizar supervisiones periódicas durante la carga de reactivo de alimentación  -Verificar que las válvulas de purga y descarga de los tanques estén cerradas	
			-Se excede la carga de reactivos en los tanques de alimentación	-Derrame del reactivo de alimentación si se supera el volumen de diseño  - Sobrepresión en la tubería debido al flujo excesivo en su interior			<b>3B</b>	-Realizar supervisiones periódicas durante la carga de reactivo de alimentación  -Abrir válvula de purga para regular el nivel del tanque
			-Apertura de válvulas V-002/003 (TK-101) y V-032/033 (TK-102)  -Obstrucción en las tuberías, ruptura o fuga del reactivo	-Alimentación insuficiente a la columna de destilación  -Riesgo de sobrecalentamiento en el motor de la bomba de alimentación y posible ruptura de eje			<b>2B</b>	-Realizar supervisiones periódicas durante la carga de reactivo de alimentación  - Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga  -Verificar que las válvulas de purga y descarga de los tanques estén cerradas
<b>MÁS</b>	Nivel	Interior del tanque	-No se realiza regulación de nivel con las válvulas V-002/003 (TK-101) y V-032/033 (TK-102)	- Derrame de reactivo por rebosar el volumen máximo	-Indicador de nivel situado en el tanque	<b>3C</b>	- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga	

			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Acumulación de reactivo por obstrucción en tubería o válvulas de control (en fondo) posición cerrada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inundación de equipos por rebose no diseñados para soportar líquido</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mantenimiento preventivo al sensor de nivel</li> <li>-Implementar alarmas por alto nivel (LAH)</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>-No se realiza regulación de nivel con las válvulas V-002/003 (TK-101) y V-032/033 (TK-102)</li> <li>- Obstrucción en válvulas de control (en fondo) posición abierta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Disminución del flujo de salida que alimenta a los reactores</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> <li>-Cavitación del sistema de bombeo de reactivo, conectado a los fondos del tanque</li> <li>- El tanque puede quedar totalmente vacío quedándose sin fase líquida, afectando los conductos y equipos que no están diseñados para el funcionamiento en seco.</li> </ul>	-Válvulas de control de nivel	<b>2C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Implementar alarmas por bajo nivel (LAL)</li> <li>-Mantenimiento preventivo al sensor de nivel</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Presión	Interior del tanque	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falla en la válvula de alivio V-001 (TK-101) y V-031 (TK-102)</li> <li>- Aumento repentino de la temperatura en el tanque</li> <li>- Venteo inadecuado del aire o vapor durante el llenado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sobrepresión en el tanque generando pérdida de contención, ruptura de los sellos y ruptura de tuberías</li> </ul>	- Indicador de presión situado en los tanques	<b>4B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH)</li> <li>-Mantenimiento preventivo al indicador de nivel</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvula de alivio</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor desgaste en el equipo</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>				
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disminución repentina de la temperatura</li> <li>- Bloqueo de bombas o líneas de succión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cavitación del sistema de bombeo de reactivo, conectado a los fondos del tanque</li> <li>- Riesgo de implosión en el tanque</li> </ul>	- Válvulas de alivio de presión	<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por baja presión (PAL)</li> <li>-Mantenimiento preventivo al indicador de presión</li> </ul>

			- Bloqueo de venteo durante el vaciado				- Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvula de alivio
<b>MÁS</b>	Temperatura	Interior del tanque	- Temperatura ambiente alta - Aumento de temperatura repentino debido a la naturaleza del reactivo	- Mayor desgaste en el equipo - Variación de las condiciones óptimas de operación en el reactor	- Indicador de temperatura situado en el tanque	<b>2B</b>	- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH) - Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura
<b>MENOS</b>			- Temperatura ambiente baja - Disminución de temperatura repentina debido a la naturaleza del reactivo	- Riesgo de fragilización del material de construcción del tanque - Generación de cristalizaciones no deseadas - Variación de las condiciones óptimas de operación en el reactor			- Implementar alarmas por baja temperatura (TAL) - Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura

**Nota:** En la tabla se evidencia el HAZOP del banco de reactores. Algunas desviaciones fueron tomadas de [Vikneswara Jayamaran, Anna Lvova, Qian Ying Ooi, Jia Wei Chong, and Yousra Hassan, “Hazard and Operability Study (HAZOP) Safety Assessment on Formaldehyde Production Plant,” 2002], [Rafael Bosh, “Planta de producción de HCOOH - Seguridad e higiene,” AFOR - Universidad autónoma de Barcelona, 2016]

**Tabla 25.**

HAZOP Banco de reactores – Nodo TK-103 y TK-104

<b>Proyecto</b>		Banco de reactores					
<b>Nodo</b>		TK-103 y TK-104		<b>P&amp;ID</b>		Figura 44	
<b>Descripción del nodo</b>		Tanques de recolección de producto		<b>Fecha</b>		31/05/2022	
<b>Intención del nodo</b>		No sobrepasar el 80% de la capacidad de diseño					
<i>Desviación</i>		<i>paso/ etapa</i>	<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvuardas</i>	<i>Valoración</i>	<i>Recomendaciones</i>
<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>						
NO	Flujo	Entrada	-No hay formación de productos en los reactores -Cierre de válvulas de descarga de producto en cada uno de los reactores -Ruptura o fuga en el sistema de red de tubería de producto	- Imposibilidad en la operación del reactor debido a falta de reactivo de alimentación -Derrame de producto que puede ser inflamable/ácido o puede presentar peligro al personal -Mayor consumo energético debido a la no transferencia en la operación de los intercambiadores E-104/103	Indicador de nivel situado en el tanque	3A	-Realizar supervisiones periódicas durante la carga de producto a los tanques de recolección - Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas implicadas en la conducción de producto - Revisar que la reacción se lleve a cabo en el reactor o grupo de reactores - Implementar indicadores de flujo en los tramos de alimentación al reactor
			-Se excede la carga de producto en los tanques de recolección - No se regula el flujo de reactivo en los reactores	-Derrame del producto si se supera el volumen de diseño - Sobrepresión en la tubería debido al flujo excesivo en su interior -Aumento significativo de la presión			3B

							- Implementar indicadores de flujo en los tramos de alimentación al reactor
<b>MENOS</b>			-Menor tasa de producción en los reactores -Obstrucción en las tuberías, ruptura o fuga de producto - Falta de regulación en válvulas de descarga de los reactores	- Menor cantidad de producto obtenido		<b>2B</b>	-Realizar supervisiones periódicas durante la descarga de reactivo  - Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga -Verificar que las válvulas de purga y toma muestras de los reactores no se encuentren abiertas - Implementar indicadores de flujo en los tramos de alimentación al reactor
<b>MÁS</b>	Nivel	Interior del tanque	-No se realiza regulación de nivel con las válvulas de descarga de producto V-134/084 de los tanques -Acumulación de producto por incremento excesivo del flujo de descarga de producto en los reactores	- Derrame de producto por rebosar el volumen máximo  - Inundación de equipos por rebose no diseñados para soportar líquido -Variación de las condiciones óptimas de operación en los reactores	-Indicador de nivel situado en el tanque	<b>3C</b>	- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga  -Mantenimiento preventivo al sensor de nivel  -Implementar alarmas por alto nivel (LAH)
<b>MENOS</b>			-No se realiza regulación de nivel con las válvulas de descarga de producto V-134/084 de los tanques - Obstrucción en válvulas de control en la descarga de producto	-Disminución del flujo de producto en el reactor o grupo de reactores -Variación de las condiciones óptimas de operación - Problemas de operación en el desarrollo de las reacciones en los reactores	-Válvulas de control de nivel	<b>2C</b>	-Implementar alarmas por bajo nivel (LAL)  -Mantenimiento preventivo al sensor de nivel

				- Velocidad de reacción o flujo de reactivos bajo en los reactores			- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga
<b>MÁS</b>	Presión	Interior del tanque	- Falla en la válvula de alivio V-083 (TK-103) y V-136 (TK-104)	-Sobrepresión en el tanque generando pérdida de contención, ruptura de los sellos y ruptura de tuberías	- Indicador de presión situado en los tanques	<b>4B</b>	- Implementar alarmas por alta presión (PAH)
			- Aumento repentino de la temperatura o volumen en el tanque	- Mayor desgaste en el equipo			
<b>MENOS</b>			- Disminución repentina de la temperatura	- Riesgo de implosión en el tanque	- Válvulas de alivio de presión	<b>2B</b>	- Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvula de alivio
			- Bloqueo de bombas o líneas de succión	-Variación de las condiciones óptimas de operación			
<b>MÁS</b>	Temperatura	Interior del tanque	- Falla en la transferencia de calor en los intercambiadores E-101/102	-Pérdida de control de la temperatura en los reactores (temperatura de producto alta)	- Indicador de temperatura situado en el tanque	<b>2B</b>	- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH)
							- Menor flujo de servicio de agua de enfriamiento en los intercambiadores E-101/102
<b>MENOS</b>			- Falla en la transferencia de calor	-Variación de las condiciones óptimas de operación en el reactor		<b>2B</b>	- Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura
							-Monitoreo de la temperatura de operación en cada uno de los reactores
							- Implementar alarmas por baja temperatura (TAL)

		en los intercambiadores E-101/102 - Mayor flujo de servicio de agua de enfriamiento en los intercambiadores E-101/102	-Pérdida de control de la temperatura en los reactores (temperatura de producto baja)  -Temperatura del aceite térmico que circula en las chaquetas de los reactores demasiado baja		- Regular el flujo de servicio de agua de enfriamiento en los intercambiadores E-101/102  - Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura  -Monitoreo de la temperatura de operación en cada uno de los reactores
--	--	--	---	--	--

**Nota:** En la tabla se evidencia el HAZOP del banco de reactores. Algunas desviaciones fueron tomadas de [Vikneswara Jayamaran, Anna Lvova, Qian Ying Ooi, Jia Wei Chong, and Yousra Hassan, “Hazard and Operability Study (HAZOP) Safety Assessment on Formaldehyde Production Plant,” 2002], [Rafael Bosh, “Planta de producción de HCOOH - Seguridad e higiene,” AFOR - Universidad autónoma de Barcelona, 2016]

**Tabla 26.**

*HAZOP Banco de reactores – Nodo TK-105 y TK-106*

<b>Proyecto</b>	Banco de reactores			<b>P&amp;ID</b>	Figura 44	
<b>Nodo</b>	TK-105 y TK-106			<b>Fecha</b>	31/05/2022	
<b>Descripción del nodo</b>	Tanque del fluido calefactor (Aceite térmico)					
<b>Intención del nodo</b>	Límite a las condiciones requeridas del proceso sin afectaciones al tanque de aceite térmico					
<i>Desviación</i>		<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvaguardas</i>	<i>Valoración</i>	<i>Recomendaciones</i>

<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>	<i>paso/ etapa</i>					
<b>NO</b>	Flujo	Entrada	<ul style="list-style-type: none"> <li>-No se realiza carga del aceite térmico por parte del encargado</li> <li>-Apertura de la válvula V-136/137 (TK-105) y V-145/146 (TK-106)</li> <li>- No se realiza recirculación del aceite térmico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No es posible transmitir calor a los reactores e intercambiadores de calor</li> <li>- Afectación de las condiciones óptimas de operación en el reactor</li> <li>-Riesgo de sobrecalentamiento en el motor de la bomba de alimentación del aceite térmico y posible ruptura de eje</li> </ul>	Indicador de nivel situado en el tanque	<b>3A</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar supervisiones periódicas durante la carga de aceite térmico al tanque</li> <li>-Verificar que las válvulas de purga y descarga del aceite se encuentren cerradas</li> <li>- Verificar el proceso de recirculación del aceite térmico</li> </ul>
<b>MÁS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Se excede la carga del aceite térmico al tanque TK-105 y TK-106</li> <li>- No se controla el flujo de la corriente de recirculación del aceite térmico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Derrame del aceite térmico si se supera el volumen de diseño</li> <li>- Sobrepresión en la tubería debido al flujo excesivo en su interior</li> <li>- Gasto energético mayor y sobrecalentamiento en el reactor e intercambiador de calor</li> </ul>		<b>3B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar supervisiones periódicas durante la carga de aceite térmico al tanque</li> <li>-Abrir válvula de purga V-146/137 para regular el nivel del tanque</li> <li>- Implementar un indicador de flujo y/o válvula de control en la tubería referente a la recirculación del aceite</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se presentan fallas en la carga del aceite térmico por parte del encargado</li> <li>-Obstrucción en válvulas y tuberías de recirculación del aceite térmico</li> <li>-Ruptura o fuga en tubería</li> <li>- El flujo de la corriente de recirculación del aceite es bajo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Baja eficiencia en los reactores e intercambiadores de calor</li> <li>-Riesgo de sobrecalentamiento en el motor de la bomba de alimentación del aceite térmico y posible ruptura de eje</li> <li>- Afectación de las condiciones óptimas de operación en el reactor</li> </ul>		<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar supervisiones periódicas durante la carga de aceite térmico al tanque</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga</li> <li>-Verificar que las válvulas de purga estén cerradas</li> <li>- Implementar un indicador de flujo en la tubería referente a la recirculación del aceite</li> </ul>

<b>MÁS</b>	Nivel	Interior del tanque	-No se realiza regulación de nivel con las válvulas V-136/137 (TK-105) y V-145/146 (TK-106) -Acumulación del aceite por obstrucción en tubería o válvulas de control (en fondo) posición cerrada	- Derrame del aceite por rebosar el volumen máximo (Pérdida por contención) - Inundación de equipos por rebose no diseñados para soportar líquido -Variación de las condiciones óptimas de operación	-Indicador de nivel situado en el tanque	<b>3C</b>	- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga -Mantenimiento preventivo al sensor de nivel -Implementar alarmas por alto nivel (LAH) -Drenar aceite adicional abriendo las válvulas de purga del tanque de aceite, ya que el aceite se expande al aumentar la temperatura pudiendo causar un posible derrame
<b>MENOS</b>			-No se realiza regulación de nivel con las válvulas V-136/137 (TK-105) y V-145/146 (TK-106) - Obstrucción en válvulas de control (en fondo) posición abierta	-Disminución del flujo de aceite que calienta el reactor y los intercambiadores de calor -Variación de las condiciones óptimas de operación -Cavitación del sistema de bombeo del aceite, conectado a los fondos del tanque -Baja eficiencia en los reactores e intercambiadores de calor	-Válvulas de control de nivel	<b>2C</b>	-Implementar alarmas por bajo nivel (LAL) -Mantenimiento preventivo al sensor de nivel - Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga - Adicionar la cantidad requerida de aceite térmico que tenga las mismas propiedades recomendadas por el fabricante
<b>MÁS</b>	Presión	Interior del tanque	- Venteo inadecuado del aire durante el llenado - Aumento repentino de la temperatura - Aumento significativo del nivel y/o temperatura en el tanque	-Sobrepresión en el tanque generando pérdida de contención, ruptura de los sellos y ruptura de tuberías - Mayor desgaste en el equipo	- Indicador de presión situado en la tubería	<b>4B</b>	- Implementar alarmas por alta presión en el tanque (PAH) -Mantenimiento preventivo al indicador de nivel

				-Variación de las condiciones óptimas de operación			- Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvula de alivio
<b>MENOS</b>				- Disminución repentina de la temperatura  - Bloqueo de bombas o líneas de succión  - Bloqueo de venteo durante el vaciado	-Cavitación del sistema de bombeo de aceite térmico, conectado a los fondos del tanque  - Riesgo de implosión en el tanque  -Variación de las condiciones óptimas de operación	- Válvula de alivio de presión V-01	<b>2B</b>  - Implementar indicador de presión en el tanque  -Verificación de flujos de entrada y salida en el tanque  - Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvula de alivio
<b>MÁS</b>	Temperatura	Interior del tanque		- Sobre calentamiento por parte de las resistencias del sistema  - Gasto energético mayor y sobrecalentamiento en el reactor e intercambiadores de calor  - Mayor desgaste en el equipo  -Variación de las condiciones óptimas de operación  -Pérdida por contención si el nivel esta fuera de los limites ya que el aceite se expande con el aumento de temperatura	- Indicador de temperatura situado en el tanque	<b>2B</b>	- Verificación del adecuado funcionamiento y mantenimiento a las resistencias del sistema de calentamiento de aceite  - Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura  -Implementar alarmas por alto nivel (LAH) y realizar mantenimiento al sensor de nivel ubicado en el tanque
<b>MENOS</b>				- Falla en el sistema de resistencias del tanque	-Baja eficiencia en el proceso de extracción en el reactor e intercambiador de calor  -Variación de las condiciones óptimas de operación  - Sobresfuerzo de la bomba debido a una mayor	- Alarma por alta temperatura	<b>2B</b>

				viscosidad del aceite térmico		
--	--	--	--	----------------------------------	--	--

**Nota:** En la tabla se evidencia el HAZOP del banco de reactores. Algunas desviaciones fueron tomadas de [Vikneswara Jayamaran, Anna Lvova, Qian Ying Ooi, Jia Wei Chong, and Yousra Hassan, “Hazard and Operability Study (HAZOP) Safety Assessment on Formaldehyde Production Plant,” 2002], [Rafael Bosh, “Planta de producción de HCOOH - Seguridad e higiene,” AFOR - Universidad autónoma de Barcelona, 2016]

### 3.2.2 Tren de evaporadores

Tabla 27.

HAZOP Tren de evaporadores – Nodo E-101

<b>Proyecto</b>		Tren de evaporadores				<b>P&amp;ID</b>	Figura 48
<b>Nodo</b>		E-101				<b>Fecha</b>	13/06/2022
<b>Descripcion del nodo</b>		Evaporador de tubos verticales modo de operación (simple efecto)					
<b>Intención del nodo</b>		Límite a las condiciones requeridas del proceso sin afectaciones a la integridad del evaporador					
<i>Desviación</i>		<i>paso/ etapa</i>	<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvuardas</i>	<i>Valoración</i>	<i>Recomendaciones</i>
<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>						
NO	Flujo	Entrada de la disolución (Alimentación)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-No se realiza carga de la disolución por parte del encargado en el tanque de alimentación TK-101</li> <li>- Cierre de la válvula de alimentación V-62</li> <li>- Ruptura u obstrucción de la tubería de alimentación</li> <li>- Apertura de válvulas V-48/45/55/51</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor gasto energético y pérdida de flujo de vapor de servicio en el evaporador</li> <li>- Sobrecalentamiento del Evaporador</li> <li>- No es posible obtener la disolución concentrada de interés</li> <li>-Riesgo de sobrecalentamiento en el</li> </ul>	- Indicador de nivel en el tanque TK-101	3A	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar supervisiones periódicas durante la carga la disolución en el tanque TK-101</li> <li>- Verificar que las válvulas V-48/45/55/51 se encuentren cerradas</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería y válvulas de servicio</li> </ul>

			-Falla en el sistema de bombeo P-101	motor de la bomba de alimentación y posible ruptura de eje			-Realizar mantenimiento y verificación a la bomba de suministro - Si el fallo es de la bomba contar con una de respaldo
<b>MÁS</b>			- Falla de la válvula de recirculación del sistema de alimentación V-49  - Mayor nivel de disolución en el tanque  -Mal funcionamiento de la bomba P-10, mayor caudal de descarga de suministro	- Aumento del significativo en el nivel del evaporador  - Mayor demanda de flujo de vapor de servicio  -Derrame de la disolución si se supera el volumen de diseño (Pérdida por contención)		<b>3B</b>	- Regular la válvula de alivio para despresurizar el evaporador, Verificar el indicador de presión. -Realizar mantenimiento y verificación a la bomba de suministro  - Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería y válvulas de servicio
<b>MENOS</b>			- Obstrucción de las tuberías de entrada del fluido - Fallas en la alimentación del fluido por falla en el sistema de bombeo P-101 (Menor descarga de caudal) - Necesidad de apertura en la entrada (falta de restricción en manipulación de la válvula V-060 y V-062). - Apertura de la(s) válvulas V-59/58/57	-Sobrecalentamiento de la disolución por falta de regulación en la proporción de vapor de servicio suministrado  - Mayor gasto energético si no se corrige la proporción de los flujos de entrada al proceso	-Rotámetro R-101	<b>2B</b>	-Realizar mantenimiento y verificación a la bomba de suministro  - Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería y válvulas de servicio  - Si el fallo es de la bomba contar con una de respaldo
<b>NO</b>	Flujo	Entrada de Vapor vivo de servicio	-Cierre de la(s) válvulas V-01/03/07	- No ingresa vapor de servicio en los tubos horizontales del intercambiador	Válvulas de apertura y cierre de suministro	<b>3A</b>	- Implementar un indicador de flujo en la entrada del vapor de servicio en el equipo

			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ruptura u obstrucción de las tuberías de servicio</li> <li>-No hay vapor de servicio en el proceso</li> <li>- Apertura de la válvula V-02</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No es posible evaporar la parte líquida de la disolución para obtener el producto de interés</li> <li>- Pérdida de energía al suministrar la disolución al evaporador</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería</li> <li>- Verificar que el proceso cuente con vapor de servicio al inicio</li> <li>- Verificar la apertura de las válvulas V-01/04/09 y el cierre de la válvula V-02</li> </ul>
<b>MÁS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Falta de restricción en manipulación de la válvula V-01/03/07 demasiado abierta</li> <li>-Falta de control en la caldera o generador de vapor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Aumento de la tasa de evaporación</li> <li>- Aumento de la caída de presión</li> <li>- Variación en la composición del producto final</li> </ul>	Indicador de presión	<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería</li> <li>- Implementar un indicador de flujo en la entrada del vapor de servicio en el equipo</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Obstrucción parcial de las tuberías de entrada de vapor de servicio por ensuciamiento o corrosión</li> <li>-Falta de restricción en manipulación de la válvula V-01/03/07 demasiado cerrada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Reducción de la tasa de evaporación</li> <li>-Afectación la composición del producto final</li> </ul>		<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería</li> <li>- Implementar un indicador de flujo en la entrada del vapor de servicio en el equipo</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Presión	Evaporador	- Falla en la válvula de alivio V-13	-Mayor consumo energetico en la operación	Indicador de presión	<b>3B</b>	- Realizar verificación y mantenimiento a los equipos de vacío

			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento repentino de la presión en el evaporador</li> <li>- Aumento de la presión de entrada de vapor vivo al evaporador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento proporcional de la temperatura de ebullición de la disolución a concentrar</li> <li>- Evaporación excesiva, mayor tiempo de evaporación</li> <li>-Sobrepresión en el equipo, ruptura de los sellos y ruptura de tuberías.</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH)</li> <li>-Realizar mantenimiento regular para los controladores y sensores</li> </ul>
<b>MENOR</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Válvula de alivio V-13 abierta</li> <li>- Se presentan fugas en el interior del evaporador</li> <li>- Disminución repentina de presión</li> <li>-Aumento de la caída de presión por incrustación en los tubos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación (baja eficiencia y tasa de evaporación)</li> </ul>		<b>1B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por baja presión (PAL)</li> <li>- Verificar que la válvula V-19 se encuentre cerrada</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza en el evaporador</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Temperatura	Evaporador	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor flujo de vapor de servicio vivo suministrado al evaporador</li> <li>- Fallo en el control de temperatura de suministro de vapor vivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Aumento de la tasa de Evaporación</li> <li>-Aumento de la fuerza impulsora de temperatura, lo que puede afectar la composición del producto.</li> <li>-Desgaste del equipo</li> </ul>	Indicador de Temperatura	<b>2C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por alta Temperatura (TAH)</li> <li>-Implementar un indicador de temperatura a la entrada de flujo de vapor vivo de servicio</li> <li>-Realizar mantenimiento regular para los controladores y sensores</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fallo en el control de temperatura de suministro de vapor vivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Disminución de la tasa de Evaporación</li> </ul>		<b>1C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por alta Temperatura (TAL)</li> </ul>

			- Menor flujo de vapor de servicio vivo suministrado al evaporador	-Disminución de la fuerza impulsora de temperatura, lo que puede afectar la composición del producto.			-Implementar un indicador de temperatura a la entrada de flujo de vapor vivo de servicio  -Realizar mantenimiento regular para los controladores y sensores
<b>MAS</b>	Nivel	Evaporador	-No se realiza regulación de nivel con las válvulas V-062 y V-063  -Acumulación de disolución a evaporar por obstrucción en tubería o válvulas de control (en fondo) posición cerrada  - Falla en el rotámetro conectado a la tubería de suministro de alimento  - Falla del indicador de nivel en el evaporador	-Mayor cantidad de líquido aumenta el tiempo de retención, lo que puede degradar la calidad del producto final  -Si se supera el nivel de diseño puede haber pérdida por contención  -Mayor gasto energético para aumentar la tasa de evaporación	-Alarma por alto nivel (LAH)	<b>3C</b>	- Realizar controles periódicos para regular el nivel, con las válvulas V-062/063  -Realizar mantenimiento regular para los controladores y sensores  - Realizar mantenimiento al rotámetro conectado a la tubería de suministro de alimento
<b>MENOS</b>			-No se realiza regulación de nivel con las válvulas V-062 y V-063  - Falla en el rotámetro conectado a la tubería de suministro de alimento  - Falla del indicador de nivel en el evaporador  -Acumulación de disolución a evaporar por	-Disminución de la tasa de Evaporación  -Disminución de la tasa de producción  - Posible sobrecalentamiento del evaporador debido a la falta de liquido			-Alarma por bajo nivel (LAL)

			obstrucción en tubería o válvulas de control (en fondo) posición abierta				
<b>OTRO</b>	Composición	Evaporador	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se presentan fallas en la separación de la disolución</li> <li>- Contaminación del flujo de proceso</li> <li>- Procesos de control de composición deficientes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cambios en la composición del producto esperado</li> <li>- Baja eficiencia en el proceso de evaporación</li> <li>- Presencia de impurezas en el producto</li> </ul>	Válvulas de apertura y cierre de suministro	<b>1C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar control de calidad al producto</li> <li>- Realizar un adecuado control de flujo en el evaporador (suministro-recirculación)</li> <li>- Realizar control según especificación del producto de evaporación deseado.</li> </ul>
<b>NO</b>	Flujo	Condensado de salida del evaporador	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bloqueo en la línea de condensado</li> <li>- Mal control en la liberación y/o recirculación de condensado</li> <li>- No ingresa flujo de vapor de servicio al evaporador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La acumulación de condensado puede afectar el proceso de condensación del vapor dentro del evaporador y disminuir la economía del vapor</li> <li>- No es posible recolectar en el tanque TK-107 el vapor condensado</li> </ul>	Válvulas de apertura y cierre de condensado	<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar mantenimiento regular para los controladores y sensores</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga, descarga y recirculación</li> </ul>

**Nota:** En la tabla se evidencia el HAZOP del tren de evaporadores. Algunas desviaciones fueron tomadas de [Widha Samarakoon, “Detailed design of a single effect evaporator with thermal vapor re compression,” University of Moratuwa, 2016. doi: 10.13140/RG.2.2.23174.78400]

**Tabla 28.**

*HAZOP Tren de evaporadores – Nodo E-102*

<b>Proyecto</b>	Tren de evaporadores	<b>P&amp;ID</b>	Figura 48
<b>Nodo</b>	E-102	<b>Fecha</b>	13/06/2022
<b>Descripción del nodo</b>	Evaporador de tubos horizontal modo de operación (simple efecto)		

<b>Intención del nodo</b>		Límite a las condiciones requeridas del proceso sin afectaciones a la integridad del evaporador					
<i>Desviación</i>		<i>paso/ etapa</i>	<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvaguardas</i>	<i>Valoración</i>	<i>Recomendaciones</i>
<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>						
<b>NO</b>	Flujo	Entrada de la disolución	- No se realiza carga de la disolución por parte del encargado en el tanque de alimentación	- Mayor gasto energético y pérdida de flujo de vapor de servicio en el evaporador	Indicador de nivel situado en el tanque TK-101	<b>3A</b>	- Realizar supervisiones periódicas durante la carga la disolución en el tanque TK-101
			- Cierre de la válvula de alimentación V-84	- Sobre calentamiento en el evaporador			- Verificar que las válvulas de alimentación estén abiertas
			- Ruptura u obstrucción de la tubería de alimentación	- No es posible obtener la disolución concentrada de interés			- Verificar que las válvulas V-48/45/55/51 se encuentren cerradas
<b>MÁS</b>			- Apertura de válvulas V-48/45/55/51	- Riesgo de sobrecalentamiento en el motor de la bomba de alimentación y posible ruptura de eje	Rotámetro R-101	<b>3B</b>	- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería
			- Falla en el sistema de bombeo				- Realizar mantenimiento y verificación a la bomba de suministro
<b>MENOS</b>			- Falla de la válvula de recirculación del sistema de alimentación V-49	- Derrame de la disolución si se supera el volumen de diseño		<b>2B</b>	- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza en las válvulas
			- Aumento en la presión del tanque de alimento y falta de control en el flujo a la salida del mismo	- Requerimiento mayor de vapor de servicio			- Verificar el indicador de presión situado en el tanque de alimentación
			- Aumento de presión de descarga de la bomba P-101	- Sobre presión en la tubería de alimentación			- Realizar mantenimiento y verificación a la bomba de suministro
			- Falla de la válvula de recirculación del	- Sobrecalentamiento de la disolución por falta de			- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para

			<p>sistema de alimentación V-49</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Obstrucción, ruptura o fuga en la tubería de alimentación</li> <li>- Disminución de presión de descarga de la bomba P-101</li> <li>- Apertura de la(s) válvulas V-59/58/57</li> </ul>	<p>regulación en la proporción de vapor de servicio suministrado</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- No es posible obtener en su totalidad la disolución concentrada de interés</li> <li>- Mayor gasto energético si no se corrige la proporción de los flujos de entrada al proceso</li> </ul>			<p>verificar el estado de tubería y válvulas de servicio</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar mantenimiento y verificación a la bomba de suministro</li> <li>- Si el fallo es de la bomba contar con una de respaldo</li> </ul>
<b>NO</b>	Flujo	Entrada de Vapor de servicio	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cierre de la(s) válvulas V-01/04/09</li> <li>- Ruptura u obstrucción de las tuberías de servicio</li> <li>- No hay vapor de servicio en el proceso</li> <li>- Apertura de la válvula V-02</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No ingresa vapor de servicio en los tubos horizontales del intercambiador</li> <li>- No es posible evaporar la parte líquida de la disolución para obtener el producto de interés</li> <li>- Pérdida de energía al suministrar la disolución al evaporador</li> </ul>	Válvulas de apertura y cierre de suministro	<b>3A</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar un indicador de flujo en la entrada del vapor de servicio en el equipo</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería</li> <li>- Verificar que el proceso cuente con vapor de servicio al inicio</li> <li>- Verificar la apertura de las válvulas V-01/04/09 y el cierre de la válvula V-02</li> </ul>
<b>MÁS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falta de restricción en manipulación de la válvula V-01/04/09</li> <li>- Exceso en el flujo de salida de vapor de servicio en la caldera o generador de vapor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento en la temperatura del vapor de servicio y exceso de calor</li> <li>- Posible rotura de los tubos del evaporador</li> <li>- Mayor gasto energético en la caldera o generador de vapor</li> </ul>			<b>2B</b>

				- Aumento en el nivel del tanque recolector de vapor vivo TK-103				
<b>MENOS</b>				<ul style="list-style-type: none"> <li>- Obstrucción de las tuberías de entrada del fluido de servicio</li> <li>- Apertura de la válvula V-02</li> <li>- Se presentan fallas en la caldera o el generador de vapor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor demanda de fluido de servicio de calentamiento</li> <li>- No es posible obtener en su totalidad la disolución concentrada de interés</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>		<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar un indicador de flujo en la entrada del vapor de servicio en el equipo</li> <li>- Verificar el adecuado funcionamiento de la caldera o generador de vapor</li> <li>- Verificar la apertura de las válvulas V-01/04/09 y el cierre de la válvula V-02</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Nivel	Evaporador	<ul style="list-style-type: none"> <li>-No se realiza regulación de nivel con las válvulas V-84/86/85</li> <li>-Acumulación de la disolución por obstrucción en tubería o válvulas de control (en fondo) posición cerrada</li> <li>- Falla en el rotámetro conectado a la tubería de suministro de alimento</li> <li>- Se presentan fallas en el indicador de nivel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mayor cantidad de líquido aumenta el tiempo de retención, lo que puede degradar la calidad del producto final</li> <li>-Si se supera el nivel de diseño puede haber pérdida por contención</li> <li>-Mayor gasto energético para aumentar la tasa de evaporación</li> </ul>	-Alarma por alto nivel (LAH)		<b>3C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar controles periódicos para regular el nivel, con las válvulas V-84/86/85</li> <li>-Realizar mantenimiento regular para los controladores y sensores</li> <li>- Realizar mantenimiento al rotámetro conectado a la tubería de suministro de alimento</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>-No se realiza regulación de nivel con las válvulas de entrada V-84</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Posible sobrecalentamiento en el evaporador debido a la falta de disolución en el equipo</li> </ul>			<b>2C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar controles periódicos para regular el nivel, con las válvulas V-84/86/85</li> </ul>

			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se presentan fallas en el indicador de nivel</li> <li>- Falla en el rotámetro conectado a la tubería de suministro de alimento</li> <li>-Apertura de válvulas V-86/85</li> <li>- Obstrucción en válvulas de control (en fondo) posición abierta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> <li>-Disminución en la tasa de producción</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar mantenimiento regular para los controladores y sensores</li> <li>- Realizar mantenimiento al rotámetro conectado a la tubería de suministro de alimento</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Presión	Evaporador	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Variación de la temperatura de la disolución</li> <li>- Aumento repentino en la presión del proceso</li> <li>- Falla en la válvula de alivio V-19</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sobrepresión en el equipo, ruptura de los sellos y ruptura de tuberías.</li> <li>- Aumento proporcional de la temperatura de ebullición de la disolución a concentrar</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> <li>- Mayor desgaste en el equipo</li> </ul>	Indicador de presión	<b>3B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH)</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza en las válvulas</li> <li>- Verificar el indicador de temperatura situado en el equipo</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se presentan fugas en el interior del evaporador</li> <li>- Apertura de la válvula de alivio V-19</li> <li>- Disminución repentina de presión</li> <li>- Variación de la temperatura de operación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> <li>- Mayor desgaste o afectaciones en el equipo</li> <li>- Riesgo de implosión en el tanque</li> </ul>			<b>1B</b>

<b>MÁS</b>	Temperatura	Evaporador	- Mayor flujo de vapor de servicio vivo suministrado al evaporador - Fallo en el control de temperatura de suministro de vapor vivo	-Aumento de la tasa de Evaporación  -Aumento de la fuerza impulsora de temperatura, lo que puede afectar la composición del producto.  -Desgaste del equipo	Indicador de Temperatura	<b>2C</b>	- Implementar alarmas por alta Temperatura (TAH)  -Implementar un indicador de temperatura a la entrada de flujo de vapor vivo de servicio -Realizar mantenimiento regular para los controladores y sensores
<b>MENOS</b>			- Fallo en el control de temperatura de suministro de vapor vivo - Menor flujo de vapor de servicio vivo suministrado al evaporador	-Disminución de la tasa de Evaporación  -Disminución de la fuerza impulsora de temperatura, lo que puede afectar la composición del producto.			- Implementar alarmas por alta Temperatura (TAL)  -Implementar un indicador de temperatura a la entrada de flujo de vapor vivo de servicio -Realizar mantenimiento regular para los controladores y sensores
<b>OTRO</b>	Composición	Evaporador	- Se presentan fallas en la separación de la disolución  - Contaminación del flujo de proceso  - Procesos de control de composición deficientes	- Cambios en la composición del producto esperado  - Baja eficiencia en el proceso de evaporación  - Presencia de impurezas en el producto	Válvulas de apertura y cierre de suministro	<b>1C</b>	-Realizar control de calidad al producto - Realizar un adecuado control de flujo en el evaporador (suministro-recirculación) - Realizar control según especificación del producto de evaporación deseado.
<b>NO</b>	Flujo	Condensado de salida	- Bloqueo en la línea de condensado	-La acumulación de condensado puede afectar el proceso de condensación del	Válvulas de apertura y cierre de condensado	<b>2B</b>	-Realizar mantenimiento regular para los controladores y sensores

		del evaporador	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mal control en la liberación y/o recirculación de condensado</li> <li>- No ingresa flujo de vapor de servicio al evaporador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>vapor dentro del evaporador y disminuir la economía del vapor</li> <li>- No es posible recolectar en el tanque TK-107 el vapor condensado</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga, descarga y recirculación</li> </ul>
--	--	----------------	---	---	--	--	---

**Nota:** En la tabla se evidencia el HAZOP del tren de evaporadores. Algunas desviaciones fueron tomadas de [Widtha Samarakoon, “Detailed design of a single effect evaporator with thermal vapor re compression,” University of Moratuwa, 2016. doi: 10.13140/RG.2.2.23174.78400]

**Tabla 29.**

*HAZOP Tren de evaporadores – Nodo E-103*

<b>Proyecto</b>		Tren de evaporadores				<b>P&amp;ID</b>	Figura 48
<b>Nodo</b>		E-103				<b>Fecha</b>	13/06/2022
<b>Descripción del nodo</b>		Evaporador de chaqueta modo de operación (simple efecto)					
<b>Intención del nodo</b>		Límite a las condiciones requeridas del proceso sin afectaciones a la integridad del evaporador (17L)					
<i>Desviación</i>		<i>paso/ etapa</i>	<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvaguardas</i>	<i>Valoración</i>	<i>Recomendaciones</i>
<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>						
NO	Flujo	Entrada de la disolución (Alimentación)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-No se realiza carga de la disolución por parte del encargado en el tanque de alimentación TK-101</li> <li>- Cierre de la válvula de alimentación V-109</li> <li>- Ruptura u obstrucción de la tubería de alimentación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor gasto energético y pérdida de flujo de vapor de servicio en el evaporador</li> <li>- Sobre calentamiento del Evaporador</li> <li>- No es posible obtener la disolución concentrada de interés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Indicador de nivel en el tanque TK-101</li> </ul>	3A	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar supervisiones periódicas durante la carga la disolución en el tanque TK-101</li> <li>- Verificar que las válvulas V-48/45/55/51 se encuentren cerradas</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Apertura de válvulas V-48/45/55/51</li> <li>-Falla en el sistema de bombeo P-101</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Riesgo de sobrecalentamiento en el motor de la bomba de alimentación y posible ruptura de eje</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>tubería y válvulas de servicio</li> <li>-Realizar mantenimiento y verificación a la bomba de suministro</li> <li>- Si el fallo es de la bomba contar con una de respaldo</li> </ul>
<b>MÁS</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falla de la válvula de recirculación del sistema de alimentación V-49</li> <li>- Mayor nivel de disolución en el tanque</li> <li>-Mal funcionamiento de la bomba P-10, mayor caudal de descarga de suministro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento del significativo en el nivel del evaporador</li> <li>- Mayor demanda de flujo de vapor de servicio</li> <li>-Derrame de la disolución si se supera el volumen de diseño (Pérdida por contención)</li> </ul>		<b>3B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Regular la válvula de alivio para despresurizar el evaporador, Verificar el indicador de presión.</li> <li>-Realizar mantenimiento y verificación a la bomba de suministro</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería y válvulas de servicio</li> </ul>
<b>MENOS</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Obstrucción de las tuberías de entrada del fluido</li> <li>- Fallas en la alimentación del fluido por falla en el sistema de bombeo P-101 (Menor descarga de caudal)</li> <li>- Necesidad de apertura en la entrada (falta de restricción en manipulación de la válvula V-58/109).</li> <li>- Apertura de la(s) válvulas V-59/60/57</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sobrecalentamiento de la disolución por falta de regulación en la proporción de vapor de servicio suministrado</li> <li>- Mayor gasto energético si no se corrige la proporción de los flujos de entrada al proceso</li> </ul>	-Rotámetro R-101	<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar mantenimiento y verificación a la bomba de suministro</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería y válvulas de servicio</li> <li>- Si el fallo es de la bomba contar con una de respaldo</li> </ul>

NO			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Cierre de la(s) válvulas V-01/05/11</li> <li>- Ruptura u obstrucción de las tuberías de servicio</li> <li>-No hay vapor de servicio en el proceso</li> <li>- Apertura de la válvula V-02</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No ingresa vapor de servicio en los tubos horizontales del intercambiador</li> <li>- No es posible evaporar la parte líquida de la disolución para obtener el producto de interés</li> <li>- Pérdida de energía al suministrar la disolución al evaporador</li> </ul>	Válvulas de apertura y cierre de suministro	<b>3A</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar un indicador de flujo en la entrada del vapor de servicio en el equipo</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería</li> <li>- Verificar que el proceso cuente con vapor de servicio al inicio</li> <li>- Verificar la apertura de las válvulas V-01/05/11 y el cierre de la válvula V-02</li> </ul>
MÁS	Flujo	Entrada de Vapor vivo de servicio a la chaqueta	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Falta de restricción en manipulación de la válvula V-01/05/11 demasiado abierta</li> <li>-Falta de control en la caldera o generador de vapor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Aumento de la tasa de evaporación</li> <li>- Variación en la composición del producto final</li> <li>-Sobrecalentamiento en la chaqueta</li> </ul>	Indicador de presión a la entrada de suministro	<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería</li> <li>- Implementar un indicador de flujo en la entrada del vapor de servicio en el equipo</li> </ul>
MENOS			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Obstrucción parcial de las tuberías de entrada de vapor de servicio por ensuciamiento o corrosión</li> <li>-Falta de restricción en manipulación de la válvula V-01/05/11 demasiado cerrada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Reducción de la tasa de evaporación</li> <li>-Afectación la composición del producto final</li> </ul>		<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería</li> <li>- Implementar un indicador de flujo en la entrada del vapor de servicio en el equipo</li> </ul>

<b>MÁS</b>	Presión	Evaporador	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falla en la válvula de alivio V-26</li> <li>- Aumento repentino de la presión en el evaporador</li> <li>- Aumento de la presión de entrada de vapor vivo al evaporador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sobrepresión en el equipo, ruptura de los sellos y ruptura de tuberías.</li> <li>-Mayor consumo energético en la operación</li> <li>- Aumento proporcional de la temperatura de ebullición de la disolución a concentrar</li> <li>- Evaporación excesiva, mayor tiempo de evaporación</li> </ul>	Indicador de presión	<b>3B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar verificación y mantenimiento a los equipos de vacío</li> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH)</li> <li>-Realizar mantenimiento regular para los controladores y sensores</li> </ul>
<b>MENOR</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Válvula de alivio V-26 abierta</li> <li>- Se presentan fugas en el interior del evaporador</li> <li>- Disminución repentina de presión</li> <li>-Aumento de la caída de presión por incrustación en los tubos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación (baja eficiencia y tasa de evaporación)</li> </ul>			<b>1B</b>
<b>MÁS</b>	Temperatura	Evaporador	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor flujo de vapor de servicio vivo suministrado al evaporador</li> <li>- Fallo en el control de temperatura de suministro de vapor vivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Aumento de la tasa de Evaporación</li> <li>-Aumento de la fuerza impulsora de temperatura, lo que puede afectar la composición del producto.</li> <li>-Desgaste del equipo</li> </ul>	Indicador de Temperatura	<b>2C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por alta Temperatura (TAH)</li> <li>-Implementar un indicador de temperatura a la entrada de flujo de vapor vivo de servicio</li> <li>-Realizar mantenimiento regular para los controladores y sensores</li> </ul>

<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fallo en el control de temperatura de suministro de vapor vivo</li> <li>- Menor flujo de vapor de servicio vivo suministrado al evaporador</li> <li>-Fuga de vapor vivo en el interior de la chaqueta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Disminución de la tasa de Evaporación</li> <li>-Disminución de la fuerza impulsora de temperatura, lo que puede afectar la composición del producto.</li> </ul>		<b>1C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por alta Temperatura (TAL)</li> <li>-Implementar un indicador de temperatura a la entrada de flujo de vapor vivo de servicio</li> <li>-Realizar mantenimiento regular para los controladores y sensores</li> </ul>
<b>MAS</b>	Nivel	Evaporador	<ul style="list-style-type: none"> <li>-No se realiza regulación de nivel con las válvulas V-109 y V-110</li> <li>-Acumulación de disolución a evaporar por obstrucción en tubería o válvulas de control (en fondo) posición cerrada</li> <li>- Falla en el rotámetro conectado a la tubería de suministro de alimento</li> <li>- Falla del indicador de nivel en el evaporador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mayor cantidad de líquido aumenta el tiempo de retención, lo que puede degradar la calidad del producto final</li> <li>-Si se supera el nivel de diseño puede haber pérdida por contención</li> <li>-Mayor gasto energético para aumentar la tasa de evaporación</li> </ul>	-Alarma por alto nivel (LAH)	<b>3C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar controles periódicos para regular el nivel, con las válvulas V-109/110</li> <li>-Realizar mantenimiento regular para los controladores y sensores</li> <li>- Realizar mantenimiento al rotámetro conectado a la tubería de suministro de alimento</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>-No se realiza regulación de nivel con las válvulas V-109 y V-110</li> <li>- Falla en el rotámetro conectado a la tubería de suministro de alimento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Disminución de la tasa de Evaporación</li> <li>-Disminución de la tasa de producción</li> </ul>		-Alarma por bajo nivel (LAL)	<b>2C</b>

			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falta del indicador de nivel en el evaporador</li> <li>-Acumulación de disolución a evaporar por obstrucción en tubería o válvulas de control (en fondo) posición abierta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Posible sobrecalentamiento del evaporador debido a la falta de líquido</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar mantenimiento al rotámetro conectado a la tubería de suministro de alimento</li> </ul>
<b>OTRO</b>	Composición	Evaporador	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se presentan fallas en la separación de la disolución</li> <li>- Contaminación del flujo de proceso</li> <li>- Procesos de control de composición deficientes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cambios en la composición del producto esperado</li> <li>- Baja eficiencia en el proceso de evaporación</li> <li>- Presencia de impurezas en el producto</li> </ul>	Válvulas de apertura y cierre de suministro	<b>1C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar control de calidad al producto</li> <li>- Realizar un adecuado control de flujo en el evaporador (suministro-recirculación)</li> <li>- Realizar control según especificación del producto de evaporación deseado.</li> </ul>
<b>NO</b>	Flujo	Condensado de salida del evaporador	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bloqueo en la línea de condensado</li> <li>- Mal control en la liberación y/o recirculación de condensado</li> <li>- No ingresa flujo de vapor de servicio al evaporador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-La acumulación de condensado puede afectar el proceso de condensación del vapor dentro del evaporador y disminuir la economía del vapor</li> <li>- No es posible recolectar en el tanque TK-107 el vapor condensado</li> </ul>	Válvulas de apertura y cierre de condensado	<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar mantenimiento regular para los controladores y sensores</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga, descarga y recirculación</li> </ul>

**Nota:** En la tabla se evidencia el HAZOP del tren de evaporadores. Algunas desviaciones fueron tomadas de [Widha Samarakoon, “Detailed design of a single effect evaporator with thermal vapor re compression,” University of Moratuwa, 2016. doi: 10.13140/RG.2.2.23174.78400]

**Tabla 30.**

HAZOP Tren de evaporadores – Nodo E-104

<b>Proyecto</b>		Tren de evaporadores			<b>P&amp;ID</b>		Figura 48
<b>Nodo</b>		E-104			<b>Fecha</b>		13/06/2022
<b>Descripción del nodo</b>		Evaporador de circulación forzada modo de operación (simple efecto)					
<b>Intención del nodo</b>		Límite a las condiciones requeridas del proceso sin afectaciones a la integridad del evaporador					
<i>Desviación</i>		<i>paso/ etapa</i>	<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvaguardas</i>	<i>Valoración</i>	<i>Recomendaciones</i>
<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>						
NO	Flujo	Entrada de la disolución (Evaporador de chaqueta y evaporador de recirculación forzada)	- No se realiza carga de la disolución por parte del encargado en el tanque de alimentación	- Mayor gasto energético y pérdida de flujo de vapor de servicio en el evaporador	Indicador de nivel situado en el tanque TK-101	3A	-Realizar supervisiones periódicas durante la carga la disolución en el tanque TK-101
			- Cierre de la válvula de alimentación V-56	- Sobrecalentamiento en el evaporador			- Verificar que las válvulas de alimentación esten abiertas
MÁS	Flujo	Entrada de la disolución (Evaporador de chaqueta y evaporador de recirculación forzada)	- Ruptura u obstrucción de la tubería de alimentación	- No es posible obtener la disolución concentrada de interés	Rotámetro R-101	2B	- Verificar que las válvulas V-48/45/55/51 se encuentren cerradas
			- Apertura de válvulas V-48/45/55/51	- Riesgo de sobrecalentamiento en el motor de la bomba de alimentación y posible ruptura de eje			- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería
MÁS	Flujo	Entrada de la disolución (Evaporador de chaqueta y evaporador de recirculación forzada)	- Falla en el sistema de bombeo	- Baja eficiencia en el intercambio de calor hacía el fluido de proceso	Rotámetro R-101	2B	- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza en las válvulas
			- Falla de la válvula de recirculación del sistema de alimentación V-49	- Requerimiento mayor de vapor de servicio			

			<p>falta de control en el flujo a la salida de este</p> <p>- Se presentan fallas en la bomba P-101</p>	<p>- Aumento significativo en nivel del evaporador</p>			<p>- Verificar el indicador de presión situado en el tanque de alimentación</p> <p>- Realizar mantenimiento y verificación a la bomba de suministro</p>
<b>MENOS</b>			<p>- Falla de la válvula de recirculación del sistema de alimentación V-49</p> <p>- Obstrucción, ruptura o fuga en la tubería de alimentación</p> <p>- Se presentan fallas en la bomba P-101</p> <p>- Apertura de la(s) válvulas V-59/58/57</p>	<p>- Sobre calentamiento de la disolución por falta de regulación en la proporción de vapor de servicio suministrado</p> <p>- Baja eficiencia en el intercambio de calor hacia el fluido de proceso</p> <p>- Mayor gasto energético si no se corrige la proporción de los flujos de entrada al proceso</p>		<b>2B</b>	<p>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería y válvulas de servicio</p> <p>- Realizar mantenimiento y verificación a la bomba de suministro</p> <p>- Si el fallo es de la bomba contar con una de respaldo</p>
<b>NO</b>	Flujo	Entrada de Vapor de servicio (Evaporador de circulación forzada y evaporador de chaqueta)	<p>- Cierre de la(s) válvulas V-01/06/12 y V-01/05/11</p> <p>- Ruptura u obstrucción de las tuberías de servicio</p> <p>- No hay vapor de servicio en el proceso</p> <p>- Apertura de la válvula V-02</p>	<p>- No ingresa vapor de servicio en los tubos del intercambiador</p> <p>- No es posible evaporar la parte líquida de la disolución para obtener el producto de interés</p> <p>- Sobre calentamiento de intercambiador de calor</p>	Válvulas de apertura y cierre de suministro	<b>3A</b>	<p>- Implementar un indicador de flujo en la entrada del vapor de servicio en el equipo</p> <p>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería</p> <p>- Verificar que el proceso cuente con vapor de servicio al inicio</p> <p>- Verificar la apertura de las válvulas V-01/06/12 y V-01/05/11 y el cierre de la válvula V-02</p>

<b>MÁS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falta de restricción en manipulación de la válvula V-01/06/12 y V-01/05/11</li> <li>- Exceso en el flujo de salida de vapor de servicio en la caldera o generador de vapor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento en la temperatura del vapor de servicio y exceso de calor</li> <li>- Posible rotura de los tubos del evaporador</li> <li>- Mayor gasto energético en la caldera o generador de vapor</li> <li>- Aumento en el nivel del tanque recolector de vapor vivo TK-105</li> </ul>		<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar un indicador de flujo en la entrada del vapor de servicio en el equipo</li> <li>- Verificar el adecuado funcionamiento de la caldera o generador de vapor</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Obstrucción de las tuberías de entrada del fluido de servicio</li> <li>- Apertura de la válvula V-02</li> <li>- Se presentan fallas en la caldera o el generador de vapor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor demanda de fluido de servicio de calentamiento</li> <li>- No es posible obtener en su totalidad la disolución concentrada de interés</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>		<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar un indicador de flujo en la entrada del vapor de servicio en el equipo</li> <li>- Verificar el adecuado funcionamiento de la caldera o generador de vapor</li> <li>- Verificar la apertura de las válvulas V-01/06/12 y V-01/05/11 y el cierre de la válvula V-02</li> </ul>
<b>MAS</b>	Nivel	Evaporador de chaqueta	<ul style="list-style-type: none"> <li>-No se realiza regulación de nivel con las válvulas V-109 y V-110</li> <li>-Acumulación de disolución a evaporar por obstrucción en tubería o válvulas de control (en fondo) posición cerrada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mayor cantidad de líquido aumenta el tiempo de retención, lo que puede degradar la calidad del producto final</li> </ul>	-Alarma por alto nivel (LAH)	<b>3C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar controles periódicos para regular el nivel, con las válvulas V-109/110</li> <li>-Realizar mantenimiento regular para los controladores y sensores</li> </ul>

			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falla en el rotámetro conectado a la tubería de suministro de alimento</li> <li>- Falla del indicador de nivel en el evaporador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Si se supera el nivel de diseño puede haber perdida por contención</li> <li>-Mayor gasto energético para aumentar la tasa de evaporación</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar mantenimiento al rotámetro conectado a la tubería de suministro de alimento</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>-No se realiza regulación de nivel con las válvulas V-109 y V-110</li> <li>- Falla en el rotámetro conectado a la tubería de suministro de alimento</li> <li>- Falla del indicador de nivel en el evaporador</li> <li>-Acumulación de disolución a evaporar por obstrucción en tubería o válvulas de control (en fondo) posición abierta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Disminución de la tasa de Evaporación</li> <li>-Disminución de la tasa de producción</li> <li>- Posible sobrecalentamiento del evaporador debido a la falta de liquido</li> <li>-Desgaste del equipo</li> </ul>	-Alarma por bajo nivel (LAL)	<b>2C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar controles periódicos para regular el nivel, con las válvulas V-109/110</li> <li>-Realizar mantenimiento regular para los controladores y sensores</li> <li>- Realizar mantenimiento al rotámetro conectado a la tubería de suministro de alimento</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Presión	Evaporador de circulación forzada y evaporador de chaqueta	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Variación de la temperatura de la disolución en los evaporadores</li> <li>- Aumento repentino en la presión del proceso de los evaporadores</li> <li>- Falla en la válvula de alivio del evaporador de chaqueta V-26</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sobrepresión en el equipo, ruptura de los sellos y ruptura de tuberías.</li> <li>- Aumento proporcional de la temperatura de ebullición de la disolución a concentrar</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>	Indicador de presión	<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH)</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza en las válvulas</li> <li>- Verificar el indicador de temperatura situado en el equipo</li> </ul>

				- Mayor desgaste en el equipo			
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se presentan fugas en el interior de los evaporadores</li> <li>- Apertura de la válvula de alivio V-26 en el evaporador de chaqueta</li> <li>- Disminución repentina de presión</li> <li>- Variación de la temperatura de operación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Variación de las condiciones óptimas de operación</li> <li>- Mayor desgaste o afectaciones en el equipo</li> <li>- Riesgo de implosión en el tanque</li> </ul>		<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por baja presión (PAL)</li> <li>- Verificar que la válvula V-26 se encuentre cerrada</li> <li>- Realizar mantenimiento preventivo y limpieza en el evaporador</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Temperatura	Evaporador de circulación forzada y evaporador de chaqueta	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor flujo de vapor de servicio vivo suministrado a los evaporadores</li> <li>- Fallo en el control de temperatura de suministro de vapor vivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Aumento de la tasa de Evaporación</li> <li>-Aumento de la fuerza impulsora de temperatura, lo que puede afectar la composición del producto.</li> </ul>	Indicador de Temperatura	<b>3C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por alta Temperatura (TAH)</li> <li>-Implementar un indicador de temperatura a la entrada de flujo de vapor vivo de servicio</li> <li>-Realizar mantenimiento regular para los controladores y sensores</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fallo en el control de temperatura de suministro de vapor vivo</li> <li>- Menor flujo de vapor de servicio vivo suministrado al evaporador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Disminución de la tasa de Evaporación</li> <li>-Disminución de la fuerza impulsora de temperatura, lo que puede afectar la composición del producto.</li> </ul>		<b>2C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por alta Temperatura (TAL)</li> <li>-Implementar un indicador de temperatura a la entrada de flujo de vapor vivo de servicio</li> <li>-Realizar mantenimiento regular para los controladores y sensores</li> </ul>

<b>OTRO</b>	Composición	Evaporador de circulación forzada y evaporador de chaqueta	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se presentan fallas en la separación de la disolución</li> <li>- Contaminación del flujo de proceso</li> <li>- Procesos de control de composición deficientes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cambios en la composición del producto esperado</li> <li>- Baja eficiencia en el proceso de evaporación</li> <li>- Presencia de impurezas en el producto</li> </ul>	Válvulas de apertura y cierre de suministro	<b>1C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar control de calidad al producto</li> <li>- Realizar un adecuado control de flujo en el evaporador (suministro-recirculación)</li> <li>- Realizar control según especificación del producto de evaporación deseado.</li> </ul>
<b>NO</b>	Flujo	Condensado de salida de los evaporadores	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bloqueo en la línea de condensado</li> <li>- Mal control en la liberación y/o recirculación de condensado</li> <li>- No ingresa flujo de vapor de servicio al evaporador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-La acumulación de condensado puede afectar el proceso de condensación del vapor dentro del evaporador y disminuir la economía del vapor</li> <li>- No es posible recolectar en el tanque TK-107 el vapor condensado</li> </ul>	Válvulas de apertura y cierre de condensado	<b>2B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Realizar mantenimiento regular para los controladores y sensores</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga, descarga y recirculación</li> </ul>

**Nota:** En la tabla se evidencia el HAZOP del tren de evaporadores. Algunas desviaciones fueron tomadas de [Widtha Samarakoon, “Detailed design of a single effect evaporator with thermal vapor re compression,” University of Moratuwa, 2016. doi: 10.13140/RG.2.2.23174.78400]

**Tabla 31.**

HAZOP Tren de evaporadores – Nodo TK-101

<b>Proyecto</b>		Tren de evaporadores				<b>P&amp;ID</b>	Figura 48
<b>Nodo</b>		TK-101				<b>Fecha</b>	13/06/2022
<b>Descripción del nodo</b>		Tanque de almacenamiento de la disolución					
<b>Intención del nodo</b>		No sobrepasar el 80% de la capacidad de diseño (38L) Temperatura de operación: -10-60°C					
<i>Desviación</i>		<i>paso/etapa</i>	<i>Causas</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Salvaguardas</i>	<i>Valoración</i>	<i>Recomendaciones</i>
<i>Palabra guía</i>	<i>Parámetro</i>						
<b>NO</b>	Flujo	Entrada	-No se realiza carga de la disolución de alimentación por parte del encargado -Falla en el indicador de nivel situado en el tanque	-Imposibilidad en la operación de evaporación debido a falta de disolución de alimentación -Riesgo de sobrecalentamiento en el motor de la bomba de alimentación y posible ruptura de eje	Alarma por máximo y bajo nivel (LAH-LAL)	<b>3A</b>	-Realizar supervisiones periódicas durante la carga de disolución de alimentación - Realizar verificación del peso registrado por la báscula durante la carga de alimento
			-Se excede la carga de disolución en la alimentación -Falla en el indicador de nivel situado en el tanque	-Derrame de la disolución de alimentación si se supera el volumen de diseño - Aumento de la presión en el tanque			Indicador del peso del alimento en el tanque
			<b>MÁS</b>	-Obstrucción en válvulas V-44/49/47	-Alimentación insuficiente al tren de evaporadores	<b>2B</b>	
<b>MENOS</b>							

			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Falla en el indicador de nivel situado en el tanque</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Riesgo de sobrecalentamiento en el motor de la bomba de alimentación a los evaporadores</li> <li>- Posible cavitación de la bomba si el caudal y la presión diferencial es baja</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga</li> <li>- Realizar verificación del peso registrado por la báscula durante la carga de alimento</li> </ul>
<b>MÁS</b>	Nivel	Interior del tanque	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Falla en el sensor de nivel</li> <li>-No se realiza regulación de nivel con las válvulas V-44 y V-45</li> <li>-Acumulación de disolución por obstrucción en tubería o válvulas de control (en fondo) posición cerrada y/o de recirculación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Derrame de disolución por rebosar el volumen máximo</li> <li>- Inundación de equipos por rebose no diseñados para soportar líquido</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> </ul>	Alarma por máximo y bajo nivel (LAH-LAL)	<b>3C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga</li> <li>-Mantenimiento preventivo al sensor de nivel</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de recirculación</li> </ul>
<b>MENOS</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>-Falla en el sensor de nivel</li> <li>-No se realiza regulación de nivel con las válvulas V-44 y V-45</li> <li>-Apertura de válvulas V-45/48/51</li> <li>- Obstrucción en válvulas de control (en fondo) posición abierta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Disminución del flujo de salida que alimenta a la columna</li> <li>-Variación de las condiciones óptimas de operación</li> <li>-Cavitación del sistema de bombeo de reactivo, conectado a los fondos del tanque</li> <li>- El tanque puede quedar totalmente vacío quedándose sin fase líquida, afectando los conductos y equipos que no</li> </ul>	-Válvulas de control de nivel	<b>2C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Verificar que las válvulas de purga y alimentación a la columna estén cerradas (V-45/48/51)</li> <li>-Mantenimiento preventivo al sensor de nivel</li> <li>- Realizar verificación/limpieza en tubería y válvulas de carga y descarga</li> </ul>

				están diseñados para el funcionamiento en seco.			
<b>MÁS</b>	Presión	Interior del tanque	- Aumento repentino de la presión - Venteo inadecuado del aire durante el llenado	-Sobrepresión en el tanque generando pérdida de contención, ruptura de los sellos y ruptura de tuberías  - Mayor desgaste en el equipo  -Variación de las condiciones óptimas de operación	-----	<b>3B</b>	- Implementar un indicador de presión  -Mantenimiento preventivo al indicador de nivel  - Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvula de alivio
<b>MENOS</b>			- Disminución repentina de la presión  - Bloqueo de venteo durante el vaciado	-Variación de las condiciones óptimas de operación			- Implementar un indicador de presión  -Mantenimiento preventivo al indicador de nivel  - Realizar verificación/limpieza en tuberías y válvula de alivio
<b>MÁS</b>	Temperatura	Interior del tanque	- Falla en el indicador de temperatura - Temperatura ambiente alta - Aumento de temperatura repentino debido a la naturaleza de la disolución	- Mayor desgaste en el equipo  -Variación de las condiciones óptimas de operación	- Indicador de temperatura situado en el tanque	<b>2C</b>	- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH)  - Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura
<b>MENOS</b>			- Falla en el indicador de temperatura - Temperatura ambiente baja - Disminución de temperatura repentino debido a la naturaleza de la disolución	- Generación de cristalizaciones no deseadas - Afectación a los equipos de bombeo por baja viscosidad  -Variación de las condiciones óptimas de operación			- Implementar alarmas por baja temperatura (TAL)  - Mantenimiento preventivo al indicador de temperatura

<b>MÁS</b>	Peso	Tanque	- Sobrellenado del tanque de alimentación por parte del encargado	- Derrame de disolución por rebosar el volumen máximo - Inundación de equipos por rebose no diseñados para soportar líquido	- Flotador de nivel máximo	<b>3C</b>	-Realizar supervisiones periódicas durante la carga de disolución de alimentación - Implementar alarma por alto peso (WAH)
<b>MENOS</b>			- La carga de disolución en el tanque de alimentación no es suficiente	- No es posible alimentar en su totalidad a los evaporadores - Posible afectación en la concentración del producto de interés	- Sensor de nivel mínimo	<b>2B</b>	-Realizar supervisiones periódicas durante la carga de disolución de alimentación - Implementar alarma por bajo peso (WAL)

**Nota:** En la tabla se evidencia el HAZOP del tren de evaporadores. Algunas desviaciones fueron tomadas de [Widha Samarakoon, “Detailed design of a single effect evaporator with thermal vapor re compression,” University of Moratuwa, 2016. doi: 10.13140/RG.2.2.23174.78400]

### 3.3 Análisis del HAZOP realizado

La tercera sección del segundo capítulo se centra en el análisis del estudio de riesgos operativos (HAZOP) realizado para el Centro de procesos e innovación para la industria sostenible (CEPIIS), el cual abarca el estudio realizado en el Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE) y el Centro de transformación y adecuación (CETA). A continuación, se presenta el análisis de los nodos de cada uno de los equipos, considerando las desviaciones, causas, consecuencias, salvaguardas, recomendaciones y la valoración realizada con la matriz de valoración de riesgos operacionales (figura 6).

Para el estudio se emplearon las palabras guías “NO”, “MÁS”, “MENOS”, “INVERSO” y los parámetros obligatorios dependiendo de la operación del equipo como flujo, temperatura, presión, nivel y algunos específicos como composición, humedad y tamaño de partícula.

El estudio HAZOP realizado en este trabajo para los equipos, es de manera general y desintegrada (Se analizaron los equipos de forma independiente), por lo tanto, se debe tener en cuenta que al realizar experimentación o pruebas con sustancias específicas en la planta piloto se debe realizar un análisis preliminar de peligros (puede centrarse en la aplicación de un what if) mediante el cual se analiza si la operación requiere realizar un estudio HAZOP.

Si se realiza alguna actualización de los equipos, instalaciones o se adiciona algún otro equipo es necesario evaluar si se realiza una modificación al estudio HAZOP o contemplar el desarrollo de un nuevo estudio HAZOP, para ello el equipo que conforma el estudio puede guiarse de los formatos e información desarrollada en este trabajo, como también será importante evaluar la posibilidad de implementar la gestión y control de cambios, la cual busca identificar los peligros y los riesgos de seguridad y salud en el trabajo (SST) asociados con los cambios en la organización, el sistema de gestión de SST o sus actividades, antes de introducir tales cambios [49].

En caso tal que no se realice ningún cambio se recomienda verificar, evaluar y validar el estudio HAZOP durante cada 6 meses, esto con el fin de detectar algún cambio mínimo que se halla presentado en el equipo o proceso.

A continuación, se realizará el análisis del HAZOP realizado a cada uno de los equipos de los centros de procesos anteriormente mencionados

### **3.3.1 Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE)**

3.3.1.a Columna de destilación. Siendo uno de los equipos más importantes dentro de la planta piloto, se establecieron diferentes nodos de estudio con el fin de realizar un estudio completo en el equipo, los nodos seleccionados son los siguientes: tanque de almacenamiento de reactivo (proceso/solvente), intercambiadores de calor para el precalentamiento del alimento y el solvente, alimentación en la columna de destilación, cima y fondo de la columna.

En los tanques de almacenamiento TK-101 y TK 102, se evidenció que las consecuencias más representativas se dan por pérdida de contención, riesgo de sobrecalentamiento en el motor de la bomba de alimentación y posible ruptura de eje, inundación de equipos por rebose no diseñados para soportar líquido y sobrepresión en el tanque que puede dar lugar a rupturas de sellos y tuberías. Las consecuencias mencionadas obtuvieron una valoración que oscila entre 2C, 3C, 3B y 4B, las cuales son consideradas como un riesgo de nivel medio, ya que se pueden corregir y adoptar medidas de control, pero existe la probabilidad de detener el proceso.

Entre las recomendaciones propuesta para que se minimicen las consecuencias se considera, realizar supervisiones periódicas durante la carga del alimento o sustancia, verificar la posición de las válvulas, realizar limpieza y mantenimientos periódicos en el equipo y tubería, e implementar alarmas por alto o bajo según el parámetro de operación.

El siguiente nodo evaluado fueron los intercambiadores de calor HE-101 y HE-102, los cuales tienen la finalidad de realizar el precalentamiento del alimento y el solvente que ingresan a la columna, las consecuencias más representativas se dan por baja eficiencia en el intercambio de calor hacia el fluido del proceso y variación de las condiciones óptimas de operación en el equipo, esto se da por una presión en el equipo debido disminución repentina de la presión, aumento considerable de la caída de presión, variación de la temperatura del suministro de servicio o por alguna fuga al interior de la carcasa.

Las consecuencias se sitúan en una valoración para el riesgo de 3B lo cual constituye a una parada del proceso o algún tipo de afectación en el equipo, los demás parámetros evaluados se sitúan en un rango de 1A,1B y 3A, siendo el riesgo en este caso bajo. Entre las recomendaciones propuestas se encuentra implementar alarmas por alto o bajo según el parámetro de operación y realizar operaciones de limpieza el equipo para evitar el ensuciamiento.

Para los siguientes nodos evaluados en la alimentación, cima y fondo de la columna, las consecuencias más representativas se dan por riesgo de inundación de la columna, arrastre, disminución en el tiempo de residencia en cada plato lo cual genera menor contacto líquido-vapor, formación de espuma en los sumideros, sobrepresión en el equipo y variación de las condiciones de operación óptimas de la columna; estas consecuencias se encuentran relacionadas a desviaciones en los parámetros de temperatura, presión y flujo.

Por último las consecuencias se sitúan en una valoración de 4A y 3B, lo cual constituye a una pérdida parcial en la operatividad de la columna y algún tipo de sobrecosto por reparaciones no planificadas.

3.3.1.b Columna de absorción. En este equipo se identificaron varios nodos puesto que el sistema de la columna cuenta con diversos equipos, como el tanque de solvente fresco y solvente gastado, el compresor de paletas rotatorias y el humidificador de aire.

En los tanques de almacenamiento de solvente fresco y solvente gastado (TK-101 y TK-103) se demostró que las consecuencias con mayor valoración de riesgo fueron: pérdida de contención y derrame de solvente, riesgo de sobrecalentamiento en el motor de la bomba de alimentación con posible ruptura de eje y sobrepresión en el tanque que puede dar lugar a rupturas de sellos y tuberías, generando una valoración de riesgo entre 2C, 3C, 3B y 4B. Las recomendaciones propuestas consideran realizar supervisiones periódicas durante la carga del solvente, verificar la posición de las válvulas, realizar limpieza y mantenimientos periódicos en el equipo y tubería, e implementar alarmas por alto o bajo según el parámetro de operación.

Por otro lado, en el compresor y humidificador de aire las consecuencias relevantes son: inundación en la columna debido a la disminución de flujo de aire y acumulación del solvente

en el fondo de la columna, mayor desgaste en el equipo por sobrecalentamiento, y variación en el porcentaje óptimo de humedad. Las consecuencias mencionadas obtuvieron una valoración que oscila entre 3B y 3C, y las recomendaciones incluyen verificar la posición de las válvulas, realizar seguimientos en la humedad del aire e implementar un indicador de flujo en las corrientes de entrada y salida.

Para la columna de absorción se destacaron las siguientes consecuencias cuya valoración oscila entre 2C y 3B: disminución de la difusividad del proceso de transferencia de masa en la columna entre el solvente y el gas (Baja eficiencia de absorción), riesgo de inundación en la columna, fugas de gas y deterioro del material del equipo. Las recomendaciones son: verificar los indicadores de presión y temperatura de la columna, realizar mantenimiento preventivo y limpieza para verificar el estado de tubería y válvulas de servicio e implementar alarmas por alto o bajo según el parámetro de operación.

3.3.1.c Secador de bandejas. Para realizar el análisis de riesgo en este equipo, se estableció un solo nodo que representa la cámara de secado y el sistema de bandejas, cuyas consecuencias más significativas fueron: posible afectación al material que se desea secar debido a la alta temperatura del aire caliente, el proceso de secado no es eficiente y desgaste del filtro y ventilador en el equipo. Estas consecuencias obtuvieron una valoración de 2C ya que no representan afectaciones graves en el equipo, pero la probabilidad de que ocurran es frecuente.

Las recomendaciones propuestas están relacionadas con realizar mantenimientos preventivos al equipo, implementar un indicador de flujo en el ducto, verificar el adecuado funcionamiento del ventilador e implementar alarmas por alto o bajo según el parámetro de operación.

3.3.1.d Extractor Sólido-líquido y líquido-líquido. El equipo de extracción cuenta con dos modalidades de operación de las cuales se analizaron, para ello se establecieron diferentes nodos de estudio con el fin de realizar un estudio completo en el equipo, los nodos seleccionados son los siguientes: tanque de fluido calefactor (aceite térmico), percolador, concentrador, y tanques colectores de solvente.

En los tanques de fluido calefactor TK-101 en el cual se almacena aceite térmico, se evidenció que las consecuencias más representativas se dan por pérdida de contención si se supera el volumen de diseño, derrame de aceite térmico que puede estar caliente, riesgo de sobrecalentamiento en el motor de la bomba de alimentación y posible ruptura de eje y sobrepresión en el tanque que puede dar lugar a rupturas de sellos y tuberías. Las consecuencias mencionadas obtuvieron una valoración que oscila entre 2C, 3C, 3B y 4B, las cuales son consideradas como un riesgo de nivel medio, ya que se pueden corregir y adoptar medidas de control, pero existe la probabilidad de detener el proceso, debido a que el aceite térmico juega un papel esencial en percolador y concentrador en el proceso.

Entre las recomendaciones propuesta para que se minimicen las consecuencias se considera, realizar supervisiones periódicas durante la carga de aceite térmico sin superar el 70% del volumen del tanque, verificar la posición de las válvulas, realizar limpieza y mantenimientos periódicos en el equipo y tubería, implementar alarmas por alto o bajo según el parámetro de operación y verificar que el aceite sea de la viscosidad permitida en el equipo.

El siguiente nodo evaluado fue el percolador, el cual se encarga de realizar el proceso de extracción sin importar la operación (sólido-líquido o líquido-líquido). Las consecuencias más representativas se dan por derrame de solvente inflamable por perdida de contención, falla en la condensación del proceso de recirculación de solvente, sobrepresión, variación de las condiciones óptimas del proceso y taponamiento en tubería por traspaso de material particulado a través de la malla de la canastilla (solo aplica para la operación sólido-líquido) cuando el tamaño de partícula es inferior al permitido (0.5 - 4 mm).

Las consecuencias se sitúan en una valoración para el riesgo de 2D,2C,3C,3B,4B lo cual constituye a una parada del proceso o algún tipo de afectación en el equipo, lo cual ocurrirá probablemente alguna vez para el caso de la valoración 2D que corresponde a la desviación de menos tamaño de partícula al interior de la canasta ubicada en el percolador. Los demás parámetros evaluados se sitúan en un rango riesgo en este caso bajo. Entre las recomendaciones propuestas se encuentra implementar alarmas por alto o bajo según el parámetro de operación y realizar operaciones de limpieza el equipo para evitar el ensuciamiento u obstrucción en los tramos de tubería del equipo

Para los siguientes nodos evaluados en el concentrador y tanques colectores de solvente TK-102 y TK-103, las consecuencias más representativas se dan por riesgo de pérdida de contención, derrame de solvente inflamable, sobrepresión en el equipo y variación en las condiciones óptimas de operación; estas consecuencias se encuentran relacionadas a desviaciones en los parámetros de temperatura, presión, flujo y nivel.

Por último las consecuencias se sitúan en una valoración de 3C,4B y 3B, lo cual constituye a una pérdida parcial en la operatividad del extractor y algún tipo de sobre costo por reparaciones no planificadas, sin embargo, dentro de la valoración realizada las consecuencias se encuentran en un riesgo medio tolerable.

### ***3.3.2 Centro de transformación y adecuación (CETA)***

3.3.2.a Banco de reactores. Debido a la extensa cantidad de equipos presentes en el banco de reactores, se decidió realizar un nodo por cada tipo de reactor (CSTR, PFR, PBR) y otros nodos para los tanques de alimentación de reactivos, recolección de producto y de calentamiento (aceite térmico).

El primer nodo hace referencia a los reactores CSTR R-101/102/103 de 1 litro y el R-104 de 3 litros. Las consecuencias de mayor impacto en estos equipos están relacionadas con: derrame del reactivo de alimentación si se supera el volumen de diseño, disminución en la velocidad de reacción del proceso, disminución en la conversión, riesgo de sobrecalentamiento en el motor de la bomba de alimentación y posible ruptura de eje, baja eficiencia en la mezcla del reactor, sobrepresión en el tanque generando pérdida de contención, ruptura de los sellos y ruptura de tuberías. Estas consecuencias tienen un rango de valoración entre 2C, 3C, 3B y 4B.

En el reactor PFR las consecuencias más representativas se dan por pérdida de contención, mayor desgaste en el equipo, posible ruptura por operar por encima de las condiciones de operación, disminución en la velocidad de reacción y la tasa de producción, sobrepresión en el tanque generando pérdida de contención, ruptura de los sellos y ruptura de tuberías. Estas consecuencias tienen un rango de valoración entre 2C, 3C, 3B y 4B.

Para el reactor PBR las consecuencias más significativas fueron: derrame del reactivo de alimentación si se supera el volumen de diseño, sinterización de ciertos catalizadores conduciendo a una mayor caída de presión y disminución del rendimiento, disminución en la conversión, sobrepresión en el tanque generando pérdida de contención, ruptura de los sellos y ruptura de tuberías. Al igual que en los demás reactores, las consecuencias tienen un rango de valoración entre 2C, 3C, 3B y 4B.

Las recomendaciones ante las consecuencias de estos reactores son: realizar supervisiones periódicas durante la carga del reactivo, regular la presión de descarga de las bombas dosificadoras de reactivo, verificar la posición de las válvulas, realizar limpieza y mantenimientos periódicos en el equipo y tubería, e implementar alarmas por alto o bajo según el parámetro de operación.

Finalmente para los tanques de alimentación de reactivos (TK-101 y TK-102), recolección de producto (TK-103 y TK-104) y de calentamiento con aceite térmico (TK-105 y TK-106), se obtuvieron las siguientes consecuencias de mayor impacto: pérdida de contención de reactivos, producto o aceite térmico, riesgo de sobrecalentamiento en el motor de la bomba de alimentación y posible ruptura de eje, inundación de equipos por rebosé no diseñados para soportar líquido y sobrepresión en el tanque que puede dar lugar a rupturas de sellos y tuberías.

Las consecuencias mencionadas obtuvieron una valoración que oscila entre 2C, 3C, 3B y 4B, y las recomendaciones propuestas son: realizar supervisiones periódicas durante la carga de la sustancia, verificar la posición de las válvulas e indicadores de operación, realizar limpieza y mantenimientos periódicos en el equipo y tubería, e implementar alarmas por alto o bajo según el parámetro de operación.

3.3.2.b Tren de evaporadores. Para realizar el HAZOP en este equipo se consideró un nodo por cada tipo de evaporador: evaporador de tubos verticales, evaporador de tubos horizontales, evaporador de chaqueta y evaporador de circulación forzada. Además de un nodo para el tanque de alimentación TK-101.

Las consecuencias relacionadas al evaporador de tubos verticales (E-101), evaporador de tubos horizontales (E-102), evaporador de chaqueta (E-103) son: derrame de la disolución si

se supera el volumen de diseño, variación en la temperatura de ebullición de la disolución a concentrar, posible sobrecalentamiento del evaporador debido a la falta de líquido, sobrepresión en el equipo generando pérdida de contención, ruptura de los sellos y ruptura de tuberías, aumento de la tasa de evaporación en el equipo. Estas consecuencias tienen un rango de valoración entre 2C, 3C, y 3B.

Para el evaporador de circulación forzada (E-104) las consecuencias son: derrame de la disolución si se supera el volumen de diseño, obstrucción en los tubos del intercambiador por ensuciamiento o taponamiento, variación en la temperatura de ebullición de la disolución a concentrar, aumento de la caída de presión en el intercambiador de coraza y tubos, posible sobrecalentamiento del evaporador debido a la falta de alimento, sobrepresión en el equipo generando pérdida de contención, ruptura de los sellos y ruptura de tuberías, aumento de la tasa de evaporación en el equipo. Estas consecuencias tienen un rango de valoración entre 2C, 3C, y 3B, asociadas a desviaciones en los parámetros de flujo, temperatura, nivel y presión.

Las recomendaciones para las consecuencias de los evaporadores son: realizar supervisiones periódicas durante la carga de disolución de alimentación, verificación de válvulas, mantenimiento preventivo a los indicadores, e implementar alarmas por alto o bajo según el parámetro de operación.

Finalmente, el último nodo del tren de evaporadores hace referencia al tanque de alimentación de disolución TK-101, en el cual se tiene a consideración las consecuencias, valoración y recomendaciones propuestas a manera general de los tanques de almacenamiento mencionados anteriormente en los otros equipos.

## 4 METODOLOGÍA BOWTIE

La metodología Bow-Tie (corbatín) permite dar una mejor descripción de las desviaciones valoradas en el HAZOP, de esta forma las personas pueden entender más fácilmente la relación entre los riesgos y los eventos que se pueden presentar, ya que describe las relaciones entre las amenazas o causas, barreras de mitigación y prevención, evento límite y consecuencias.

Para aplicar esta metodología se consideró la valoración realizada en el análisis funcional de operatividad HAZOP en cada uno de los equipos, la cual se realizó con la matriz de valoración de riesgos operacionales (figura 6). Debido a que esta valoración nos permite clasificar el nivel del riesgo en bajo, medio, alto o crítico dependiendo de la probabilidad y las consecuencias del escenario, los corbatines se realizaron en los nodos en donde se obtuvo la más alta valoración ya que estos escenarios representan mayores consecuencias en el proceso.

Estas valoraciones estuvieron en un rango de 3B y 3C que representa un riesgo de nivel medio o tolerable, lo que indica que se puede corregir o adoptar medidas de control inmediato, pero es posible que se lleve a cabo una parada de proceso. Es así que, con el fin de desarrollar los corbatines para cada equipo, se ilustran las amenazas, barreras de mitigación y prevención, el peligro, evento límite y las consecuencias de forma práctica, mediante el esquema del corbatín.

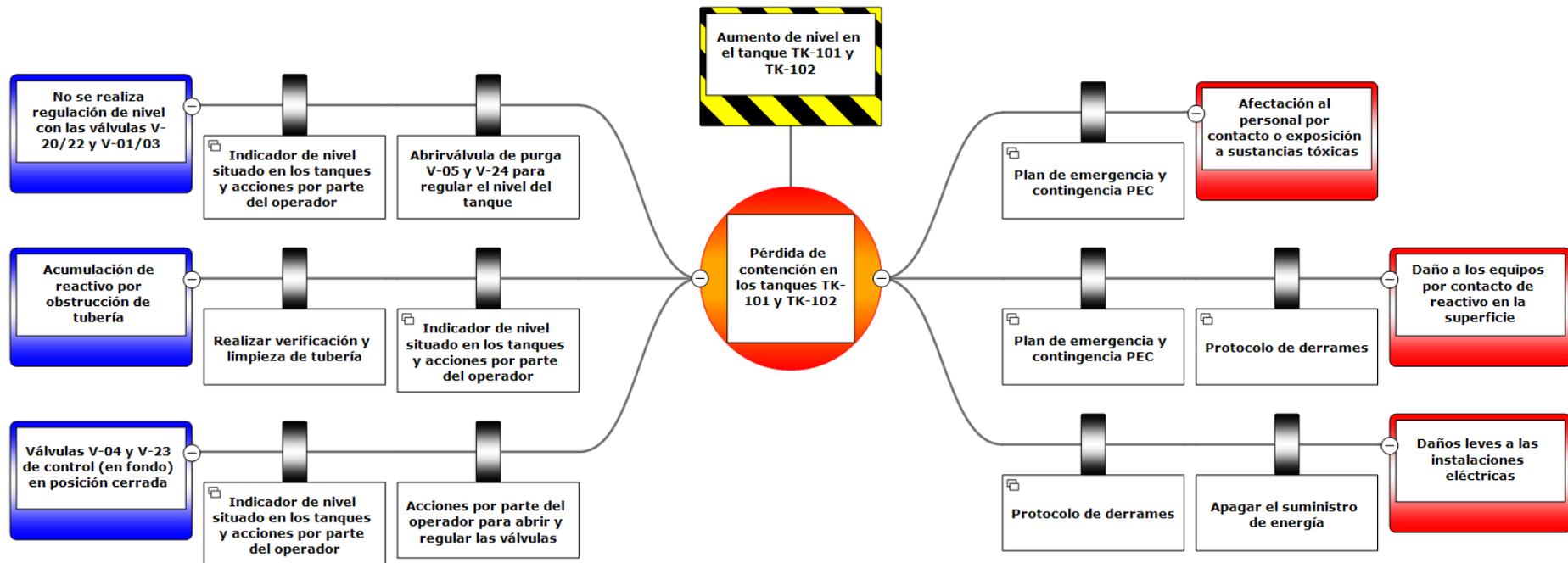
A continuación, se presentan los corbatines realizados para cada equipo del centro de procesos CEPURE y CETA de la planta piloto.

## 4.1 Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE)

### 4.1.1 Columna de destilación

Figura 49.

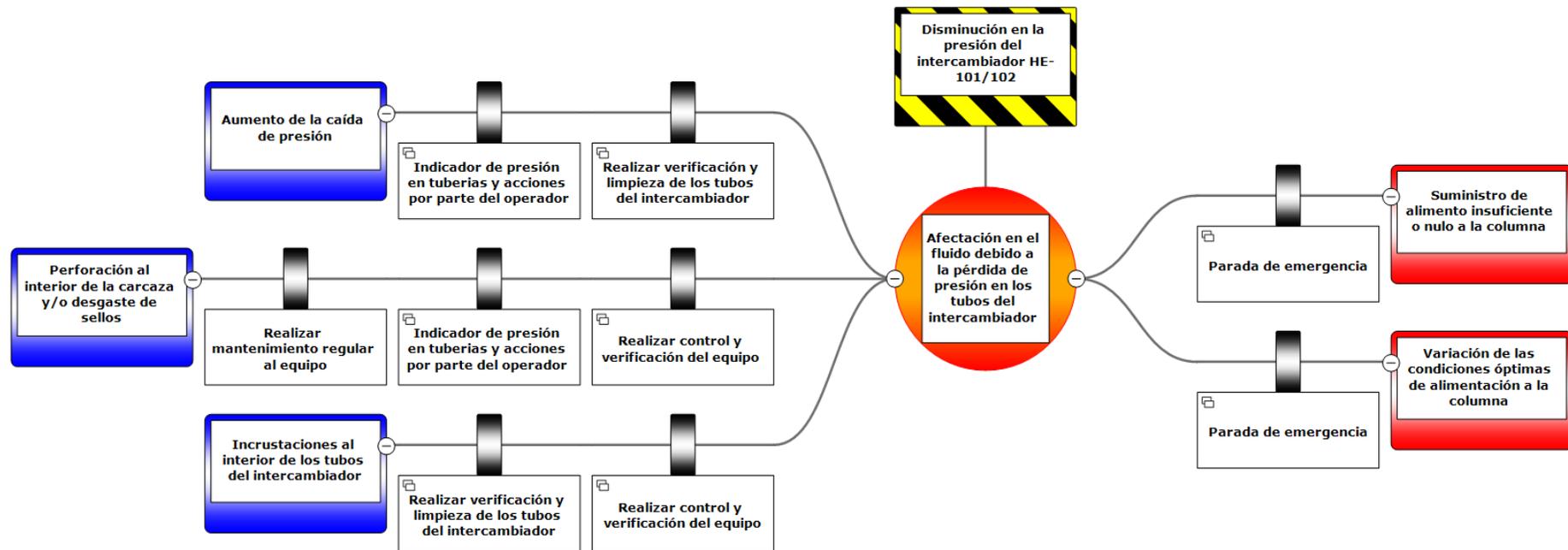
Columna de destilación – Pérdida de contención en los taques TK-101 y TK-102



Nota: Corbatín - Pérdida de contención en los taques TK-101 y TK-102.

**Figura 50.**

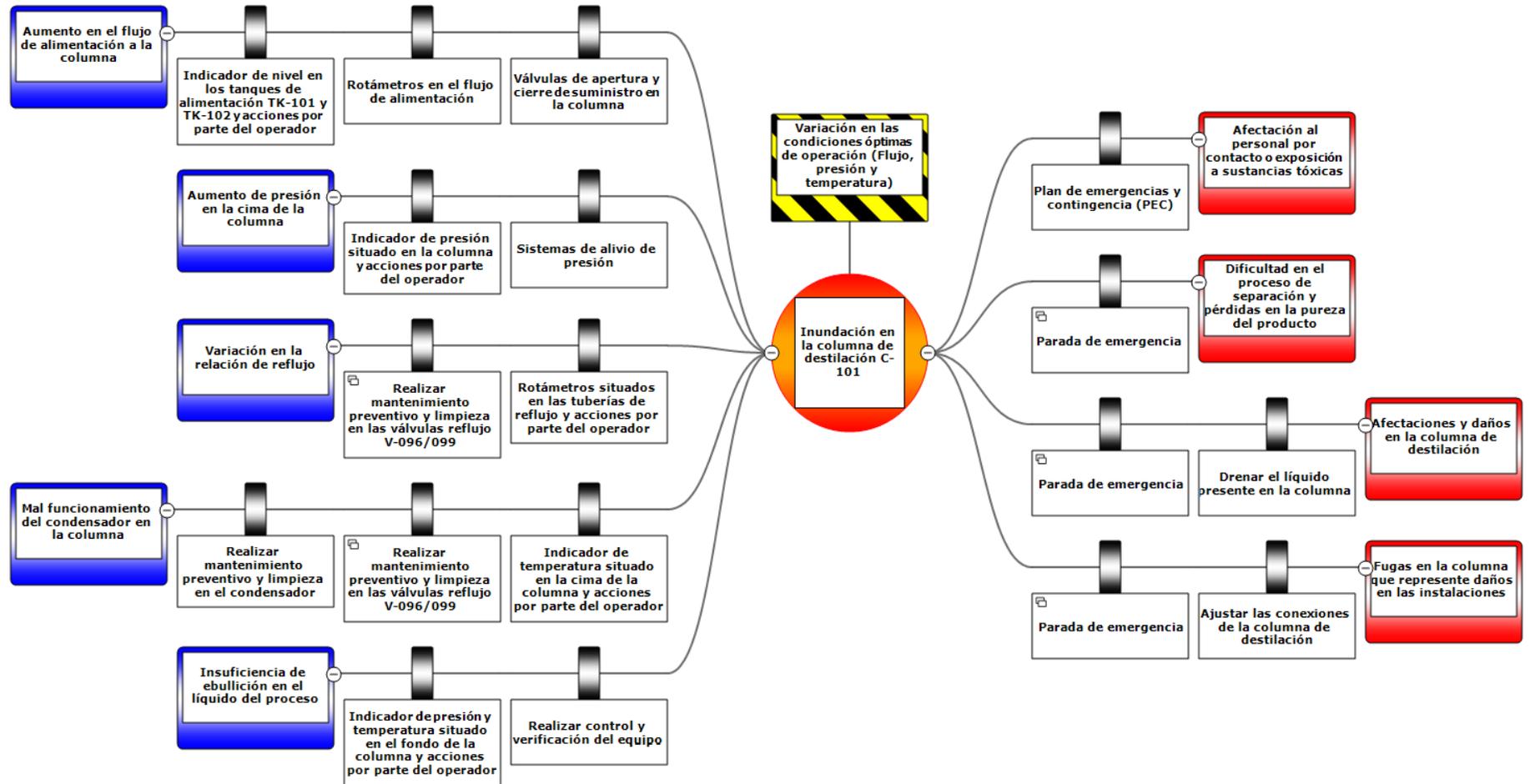
*Columna de destilación – Disminución en la presión del intercambiador HE-101/102*



**Nota:** Corbatín - Disminución en la presión del intercambiador HE-101/102.

**Figura 51.**

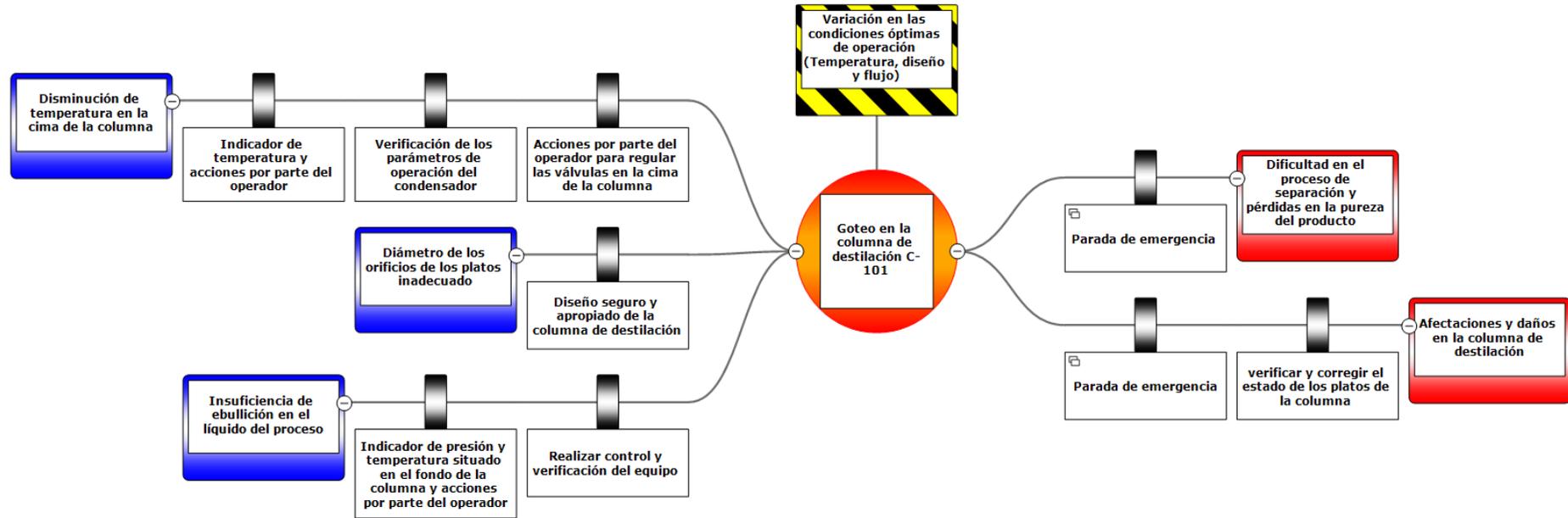
*Columna de destilación – Inundación en la columna*



**Nota:** Corbatín – Inundación en la columna.

Figura 52.

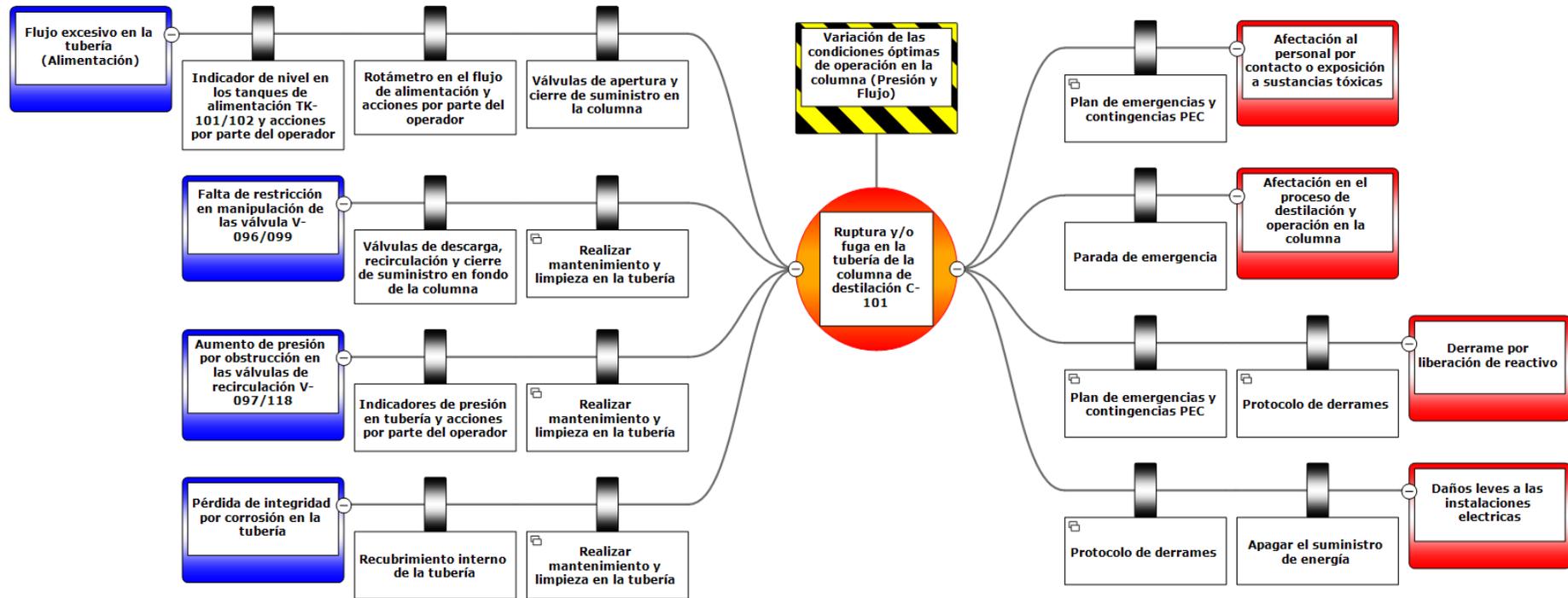
Columna de destilación – Goteo en la columna



Nota: Corbatín – Goteo en la columna.

Figura 53.

Columna de destilación – Ruptura de tuberías

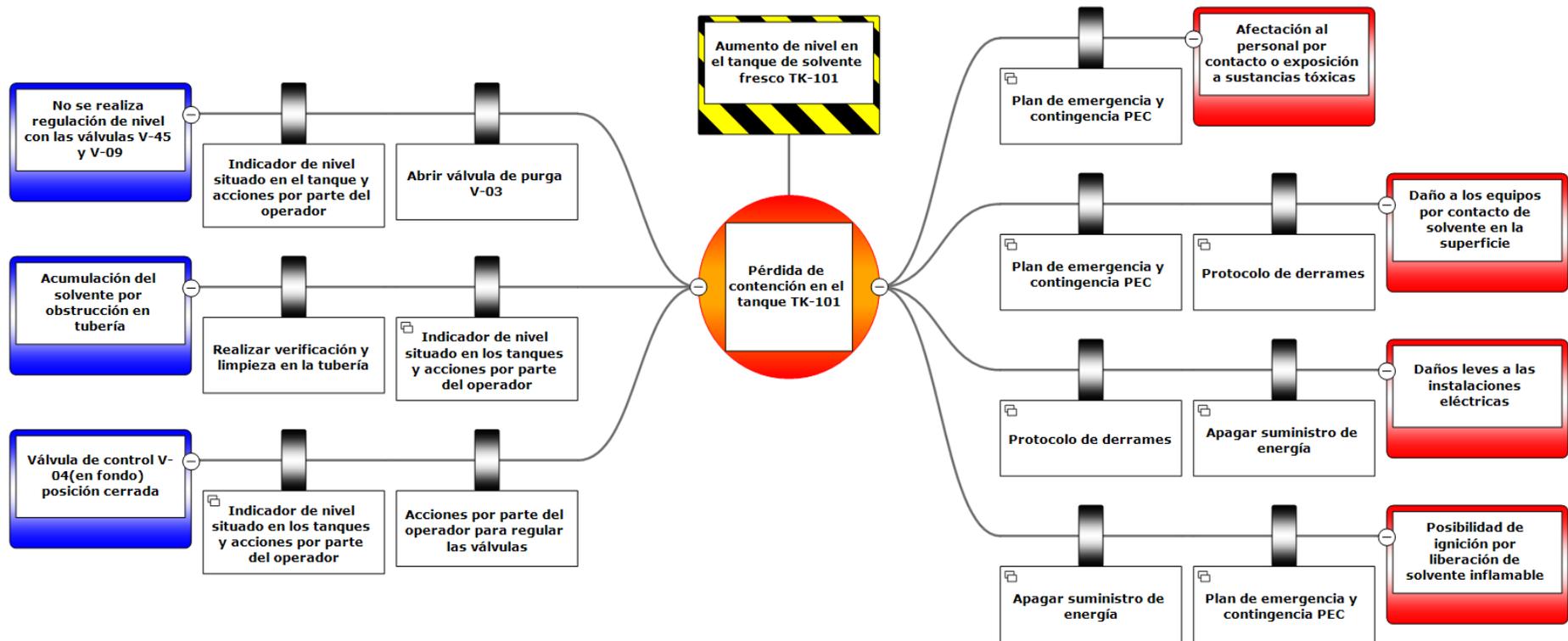


Nota: Corbatín – Ruptura de tuberías.

### 4.1.2 Columna de absorción

Figura 54.

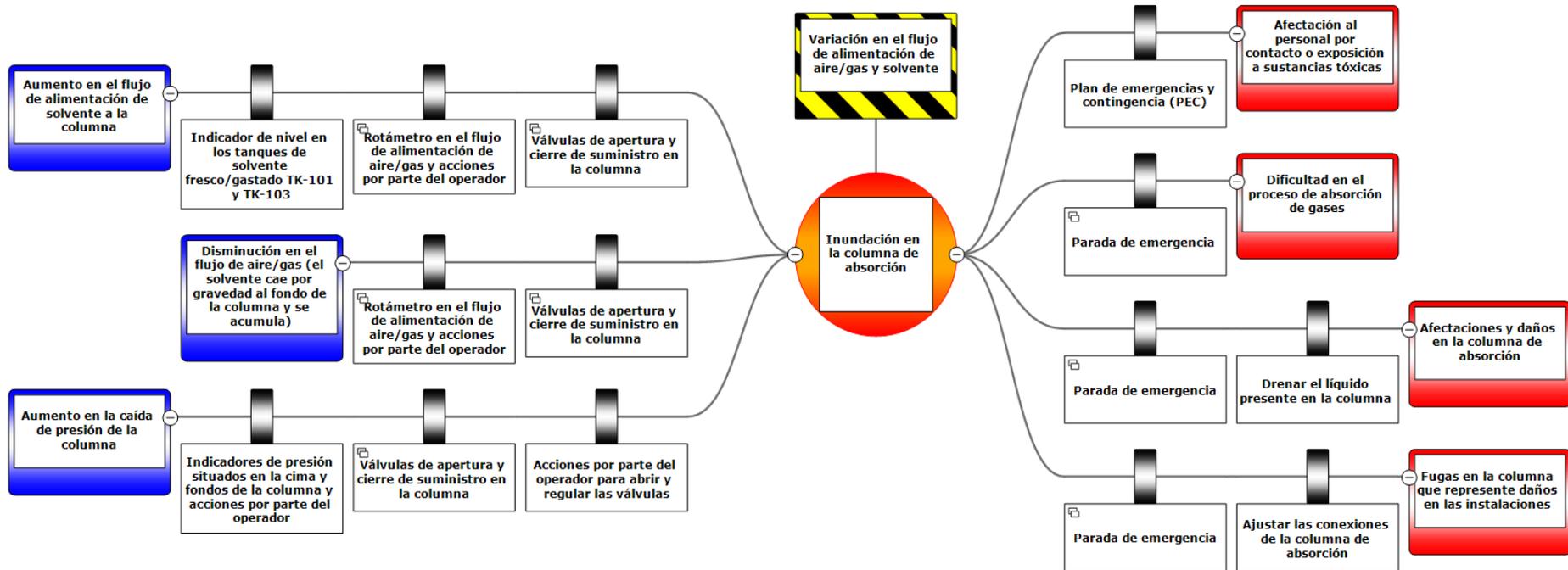
Columna de absorción – Aumento de nivel en el tanque de solvente fresco



**Nota:** Corbatín – Aumento de nivel en el tanque de solvente fresco.

Figura 55.

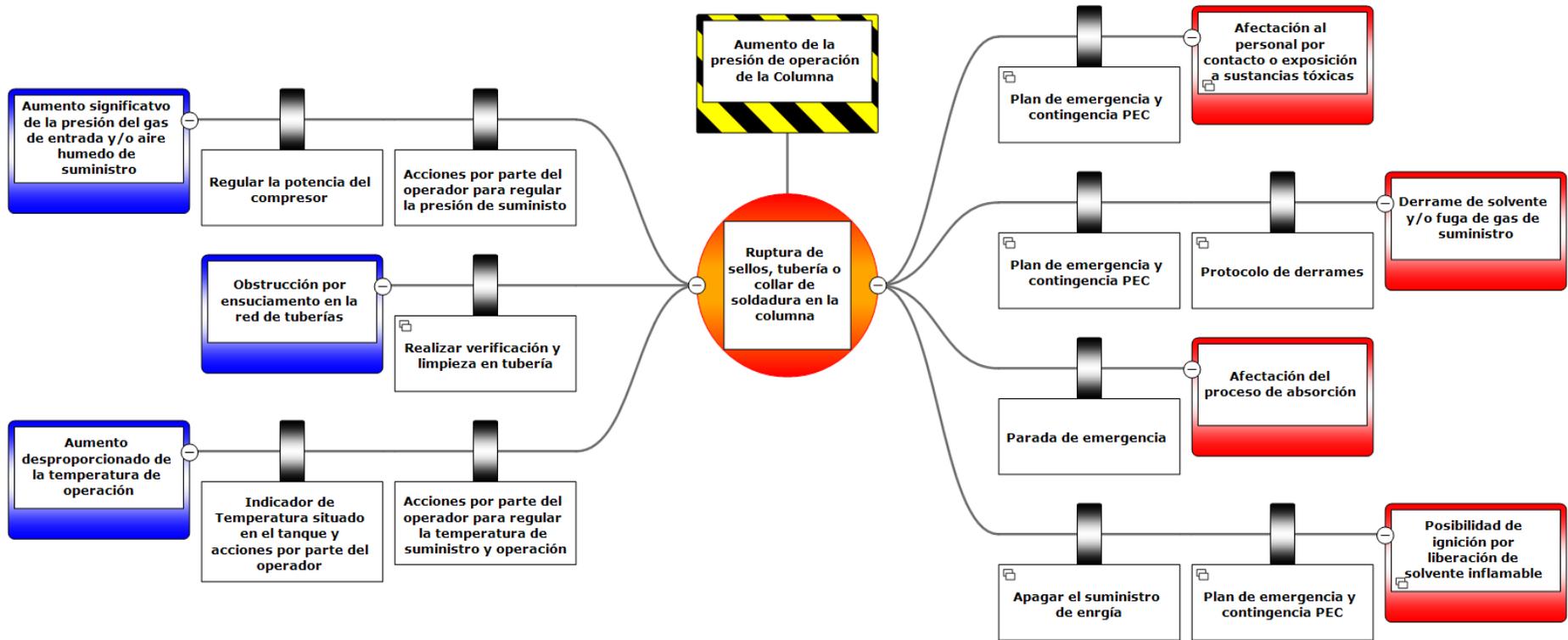
Columna de absorción – Inundación en la columna



Nota: Corbatín – Inundación en la columna.

Figura 56.

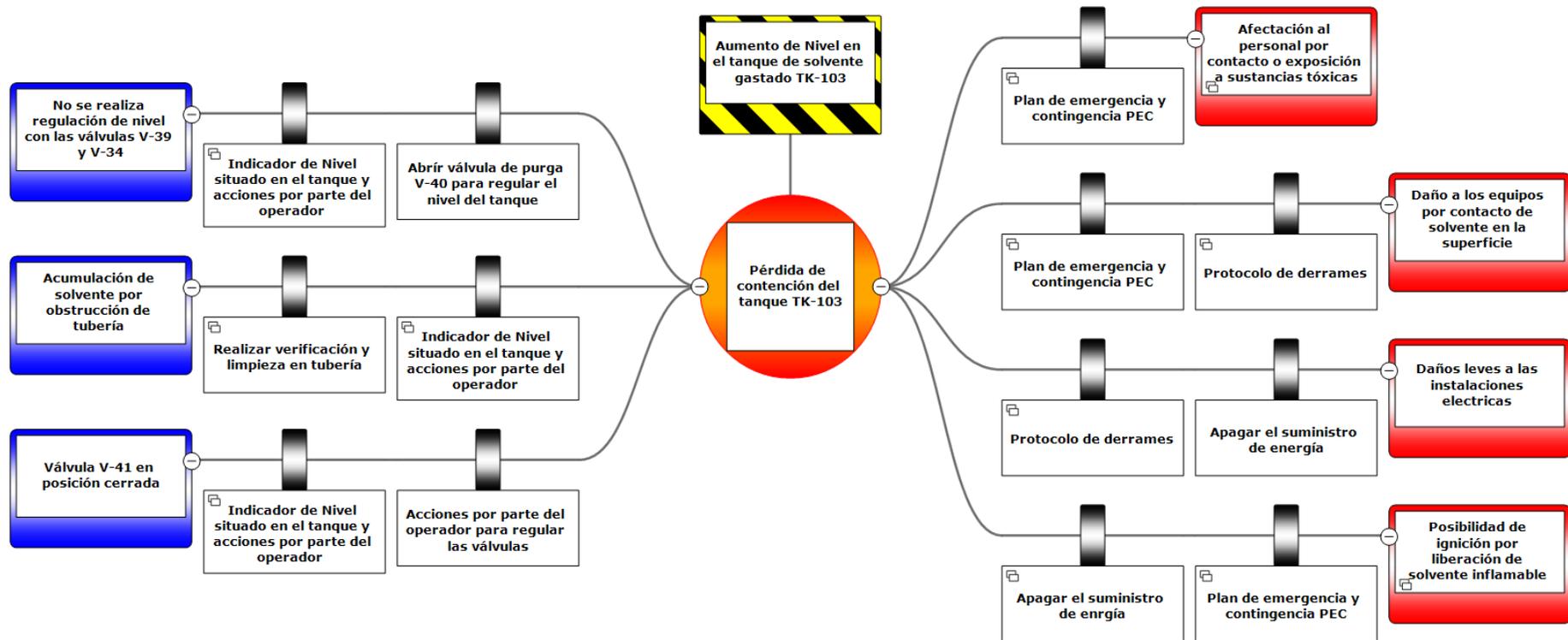
Columna de absorción – Ruptura de sellos, tubería o collar de soldadura



**Nota:** Corbatín – Ruptura de sellos, tubería o collar de soldadura.

Figura 57.

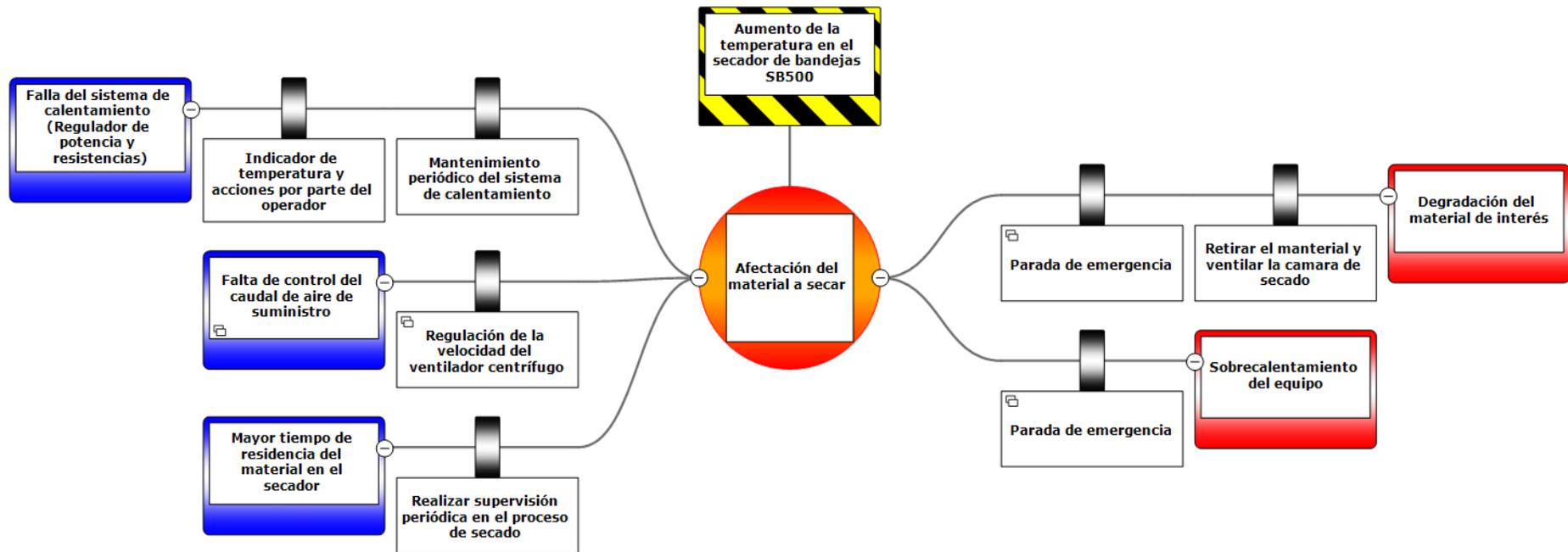
Columna de absorción – Aumento de nivel en el tanque de solvente gastado



Nota: Corbatín - Aumento de nivel en el tanque de solvente gastado.

### 4.1.3 Secador de bandejas SB-500

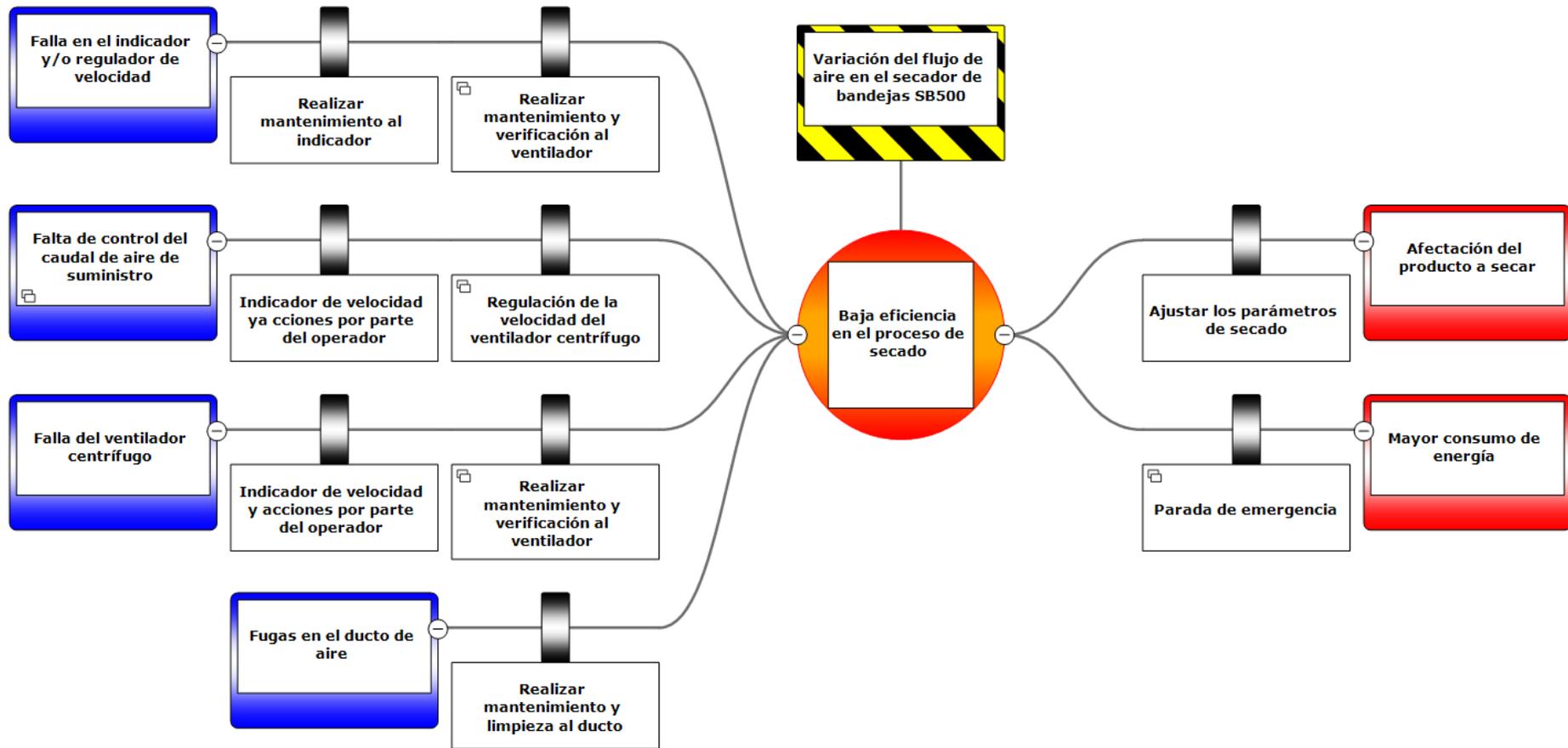
Figura 58. Secador de bandejas- Aumento de temperatura y afectación al material



Nota: Corbatín - Aumento de temperatura y afectación al material.

Figura 59.

Secador de bandejas - Variación de flujo de aire

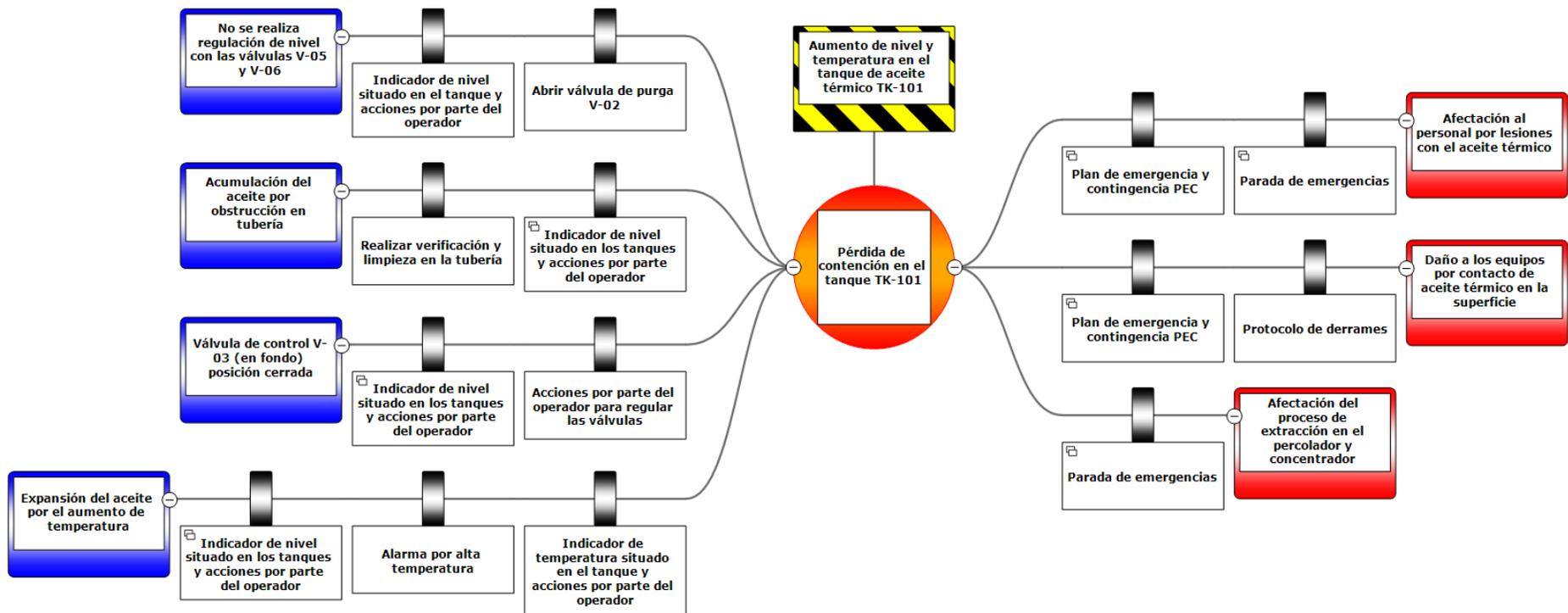


Nota: Corbatín - Variación de flujo de aire.

#### 4.1.4 Extractor sólido-líquido y líquido-líquido

Figura 60.

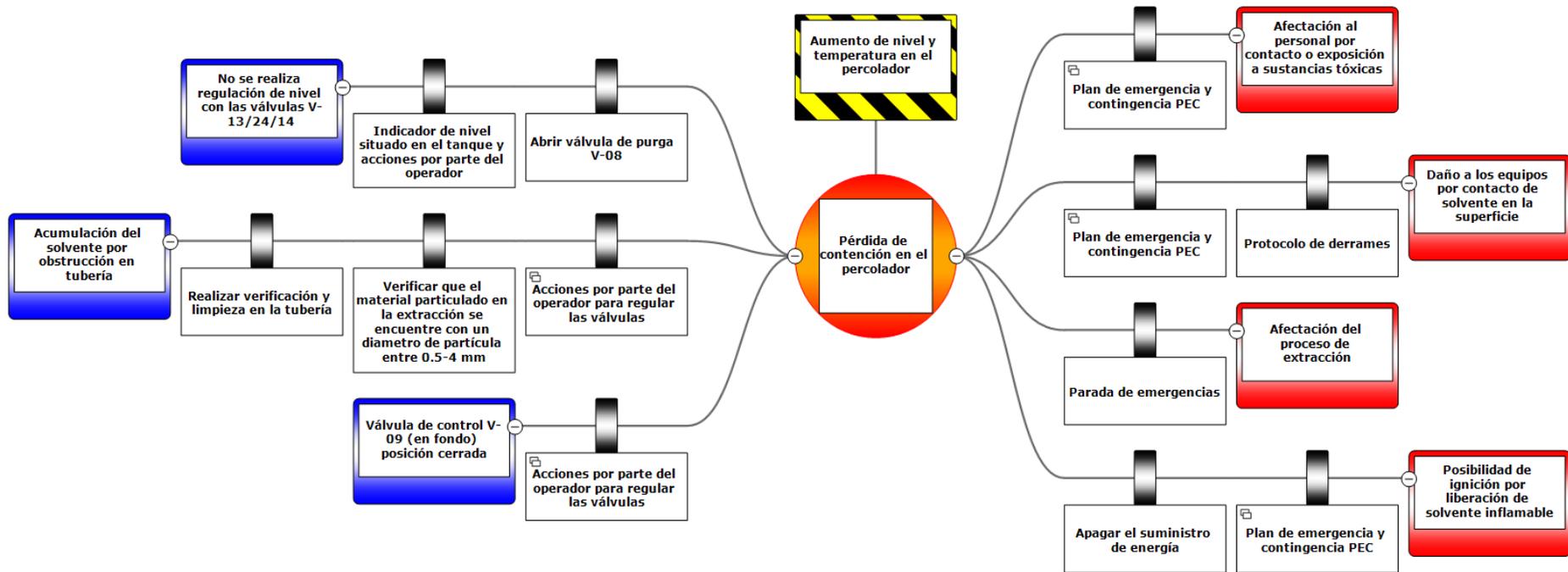
Extractor líquido-líquido y sólido-líquido – Tanque de aceite térmico



**Nota:** Corbatín – Tanque de aceite térmico.

Figura 61.

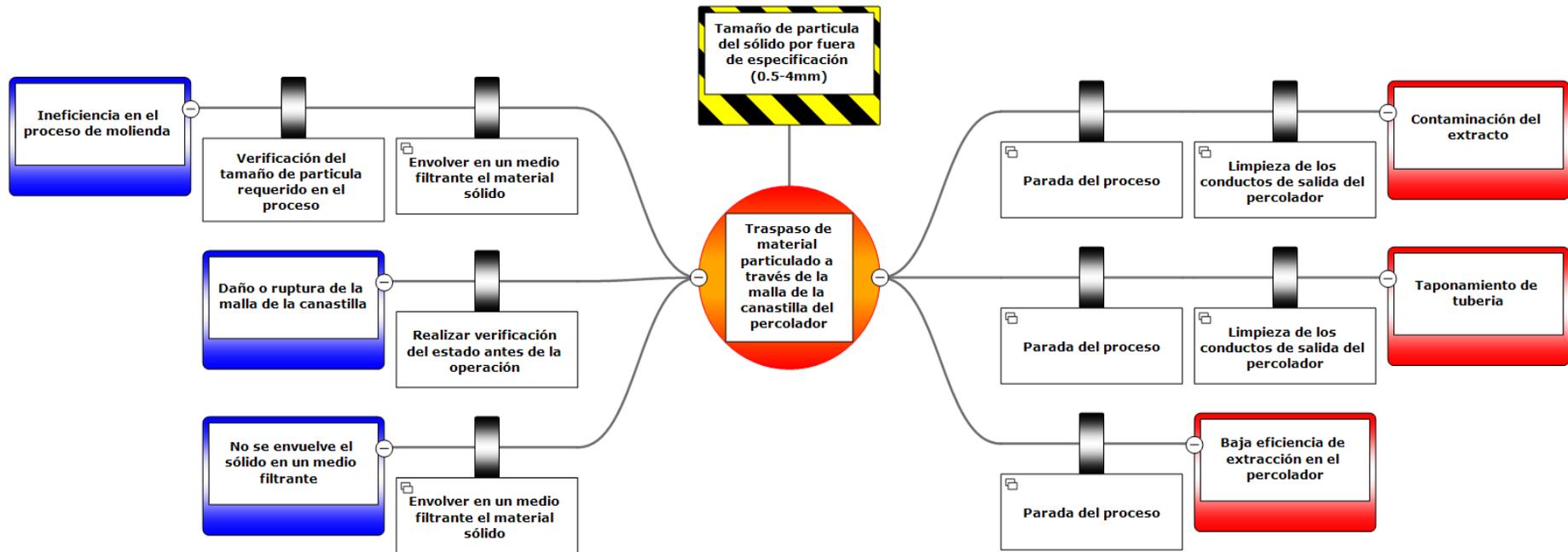
Extractor líquido-líquido y sólido-líquido – Pérdida de contención del percolador



Nota: Corbatín – Pérdida de contención del percolador.

Figura 62.

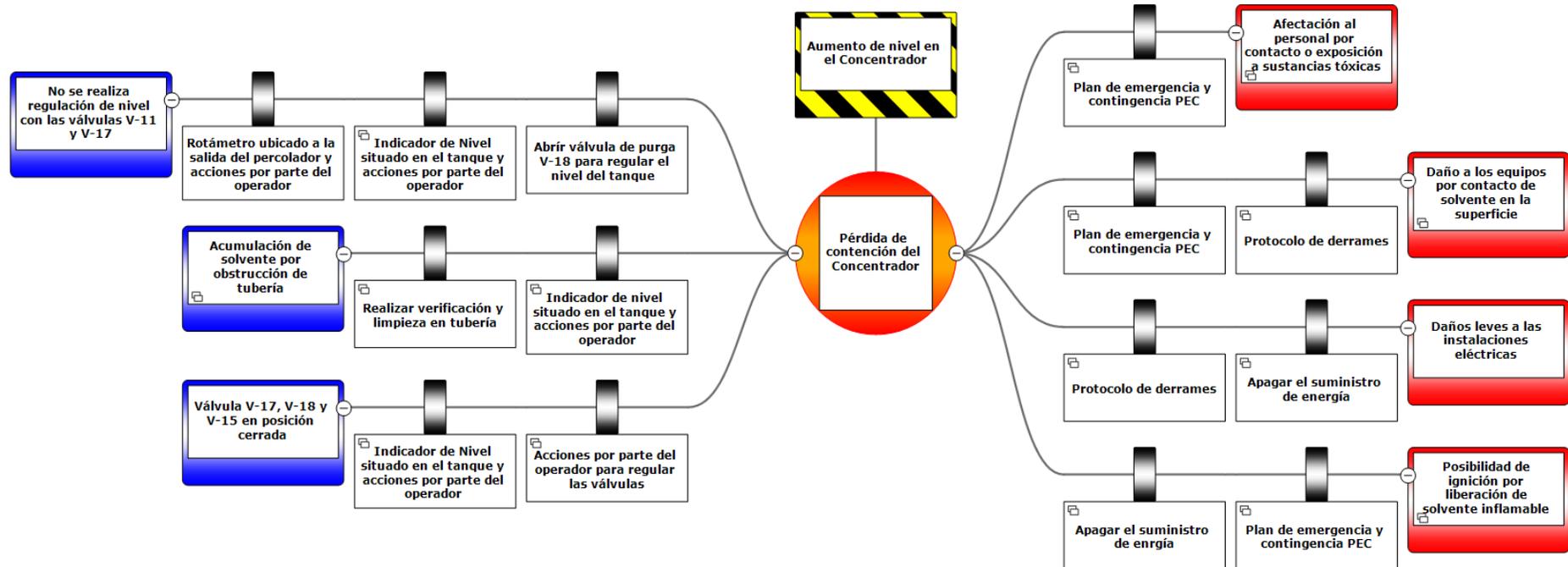
Extractor líquido-líquido y sólido-líquido – Tamaño de partícula en el percolador



Nota: Corbatín – Tamaño de partícula en el percolador.

**Figura 63.**

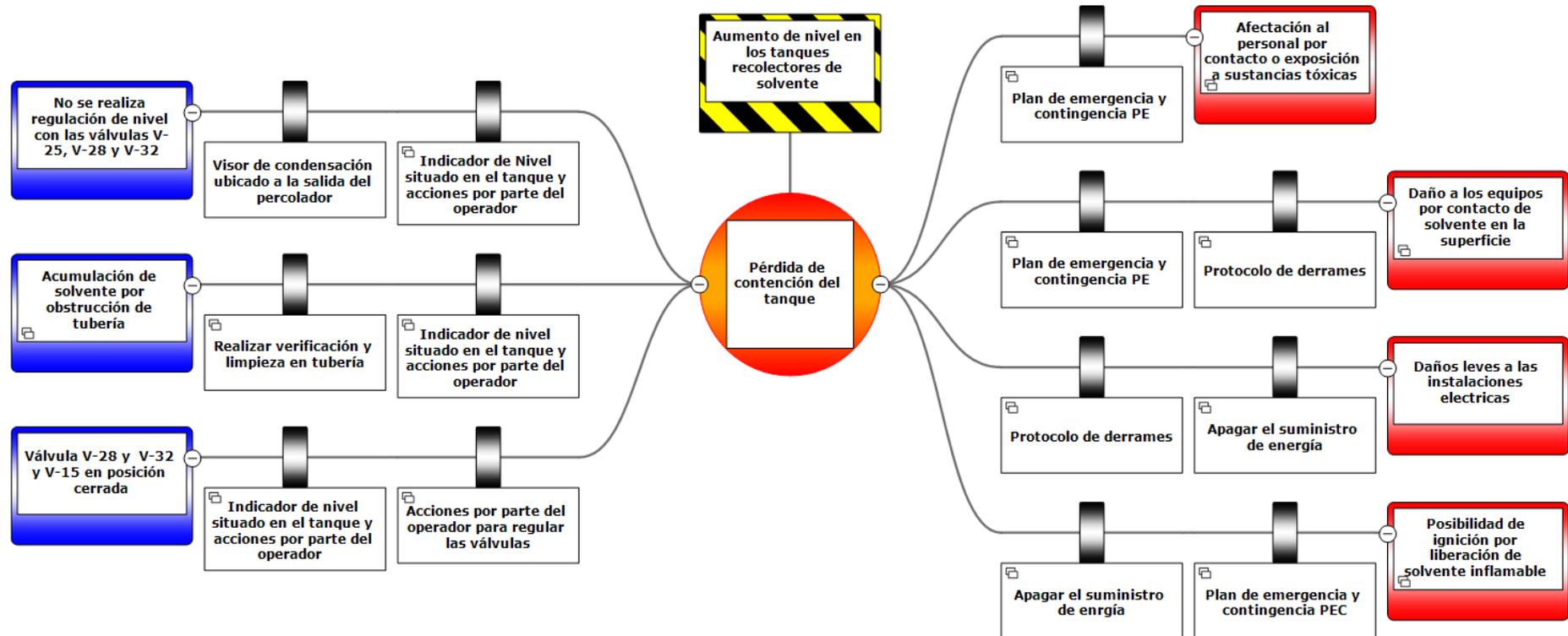
*Extractor líquido-líquido y sólido-líquido – Pérdida de contención del concentrador*



**Nota:** Corbatín – Pérdida de contención del concentrador.

Figura 64.

Extractor líquido-líquido y sólido-líquido – Pérdida de contención en los tanques recolectores



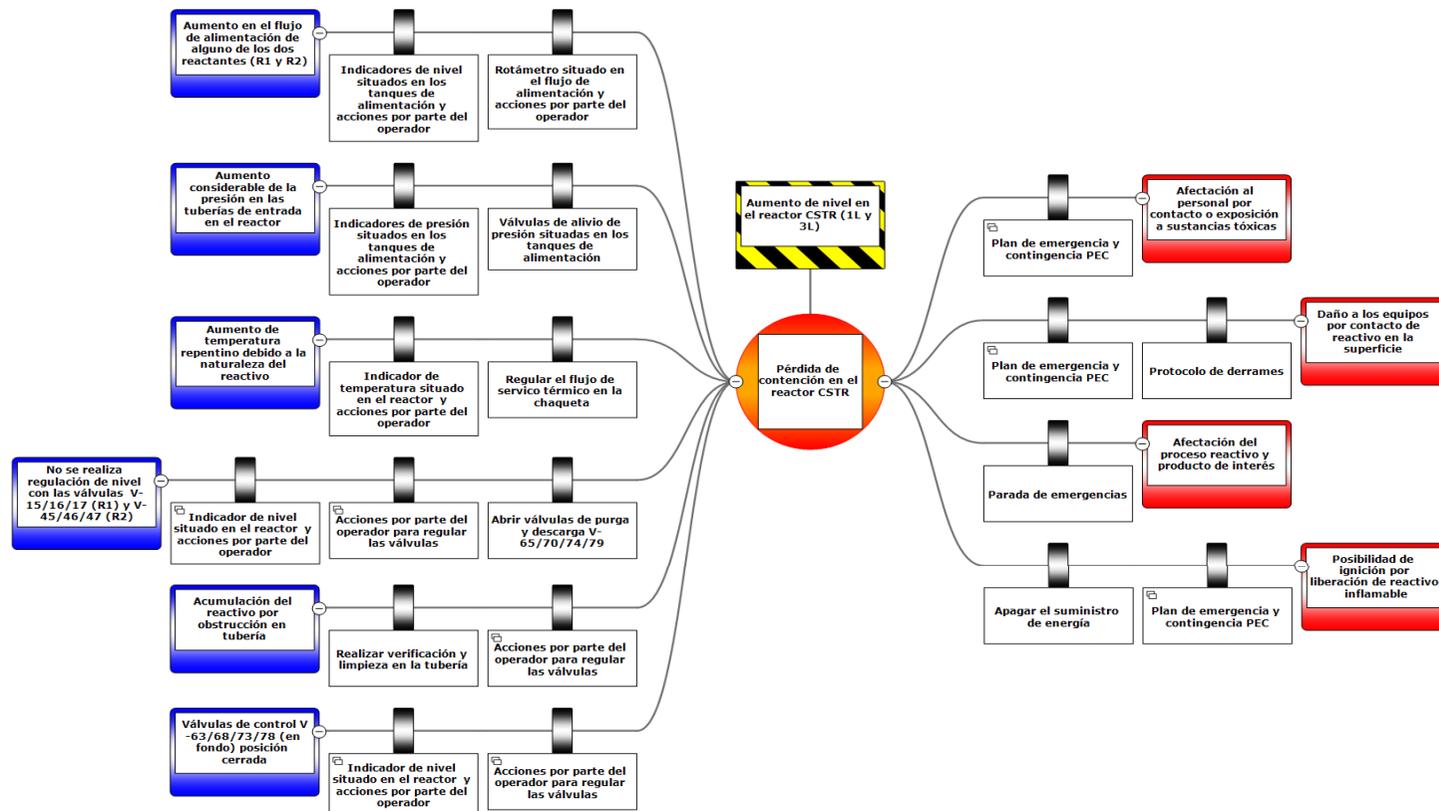
**Nota:** Corbatín – Pérdida de contención en los tanques recolectores.

## 4.2 Centro de transformación y adecuación (CETA)

### 4.2.1 Banco de reactores

Figura 65.

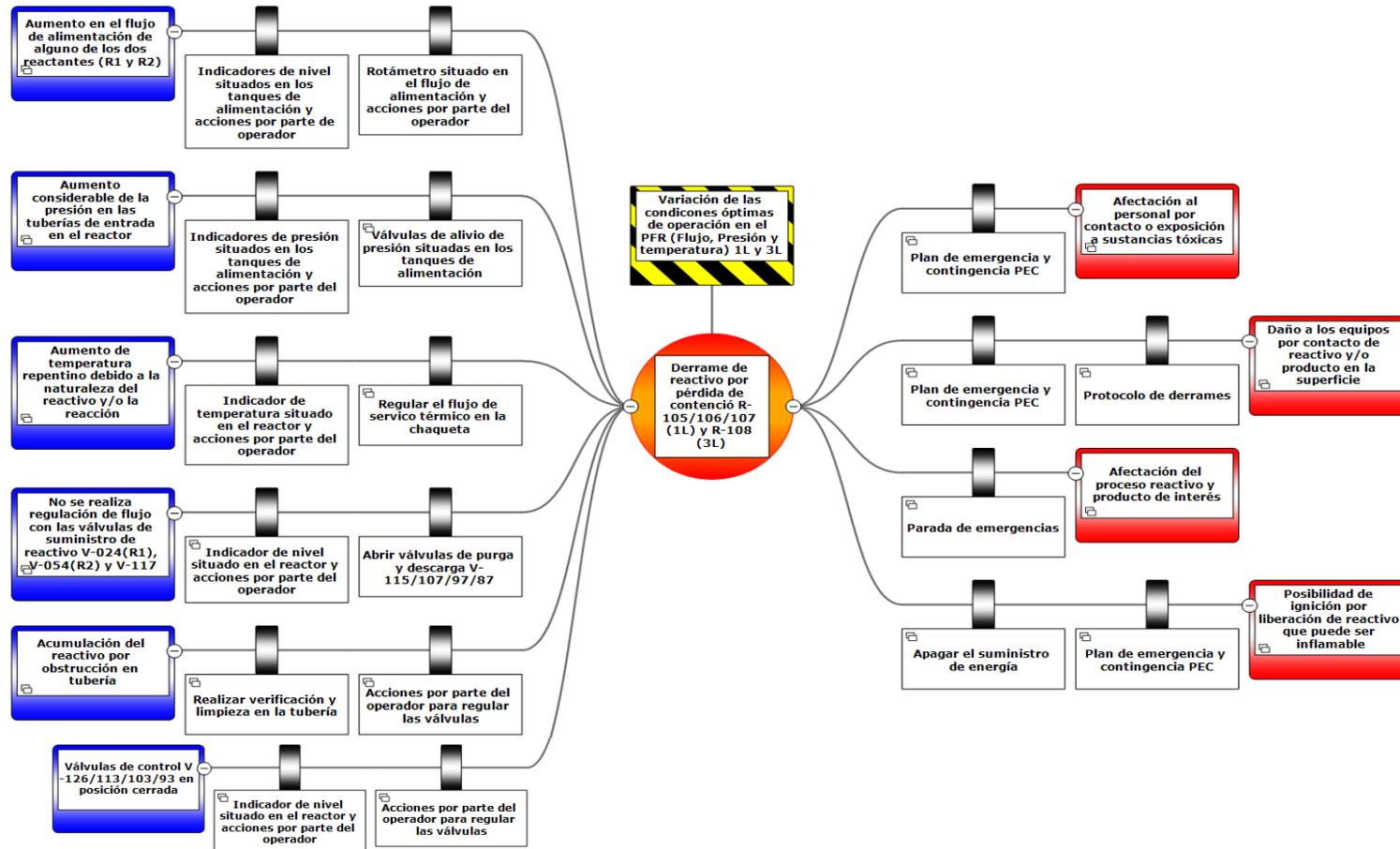
Banco de reactores – Pérdida de contención en reactores CSTR



Nota: Corbatín – Pérdida de contención en reactores CSTR.

Figura 66.

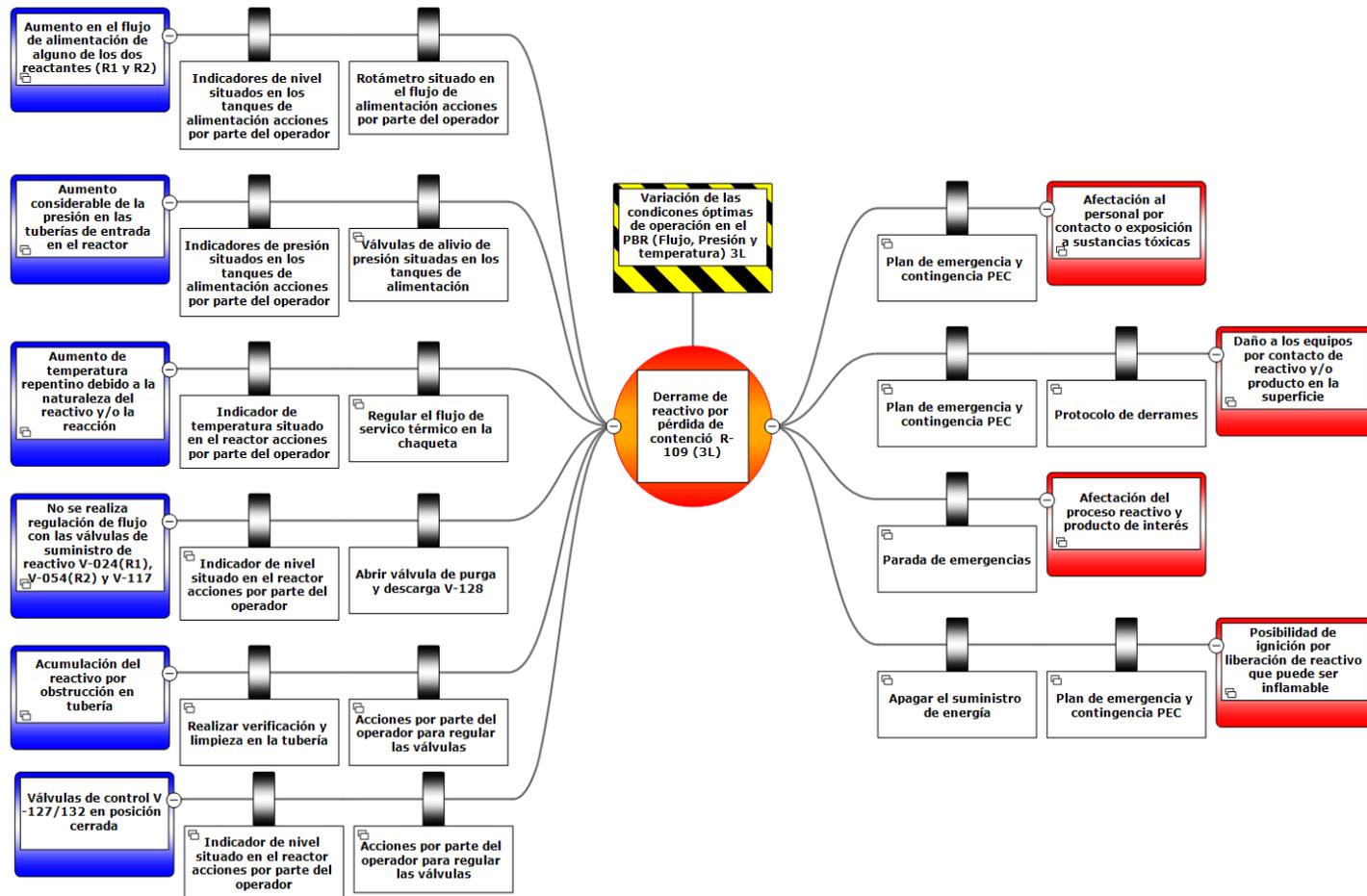
Banco de reactores – Pérdida de contención en reactores PFR



Nota: Corbatín – Pérdida de contención en reactores PFR.

**Figura 67.**

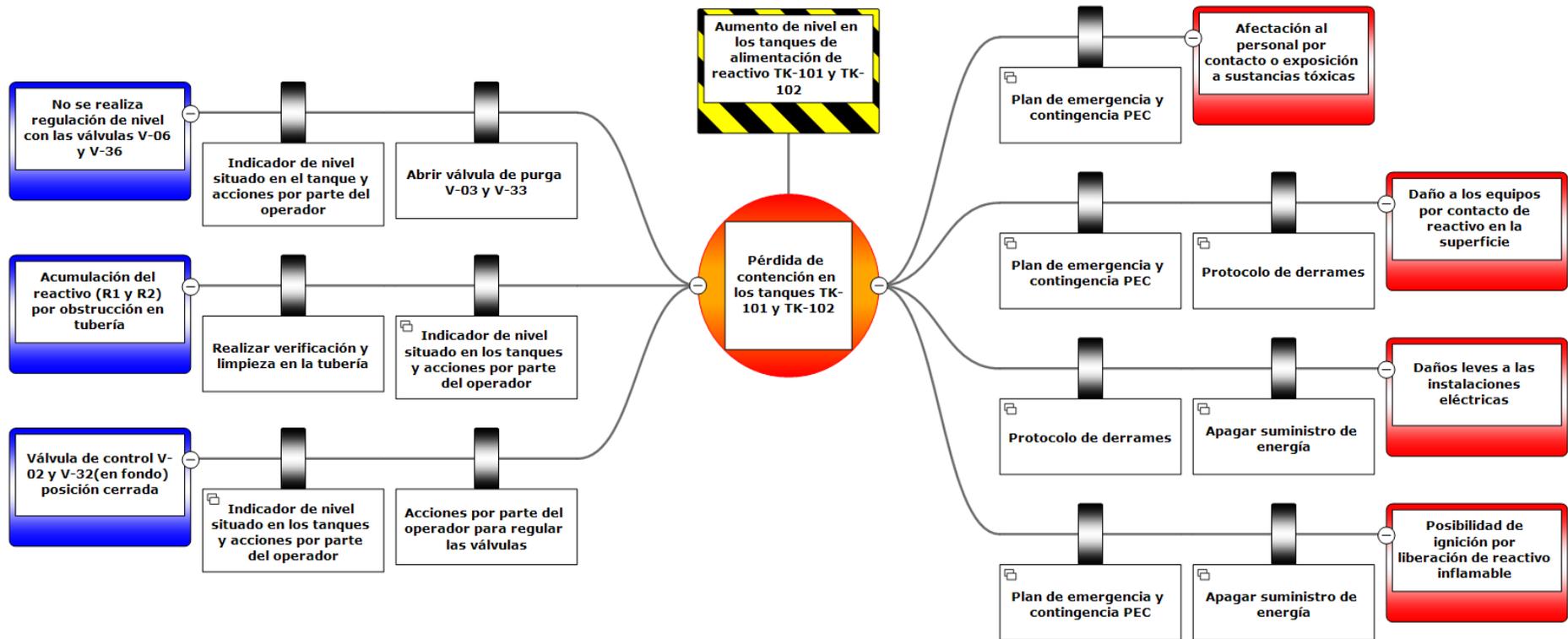
*Banco de reactores – Pérdida de contención en reactor PBR*



**Nota:** Corbatín – Pérdida de contención en reactor PBR.

Figura 68.

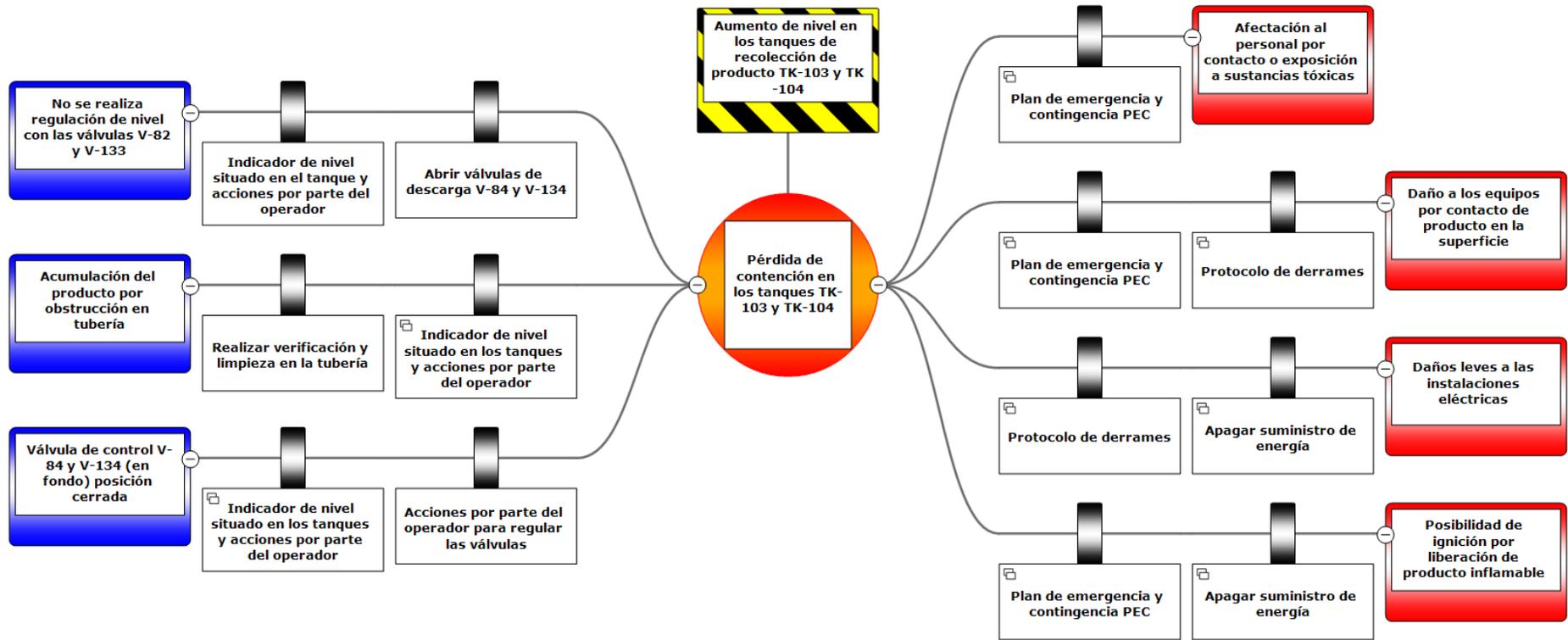
Banco de reactores – Tanques de alimentación TK-101 y TK-102



Nota: Corbatín – Tanques de alimentación TK-101 y TK-102.

**Figura 69.**

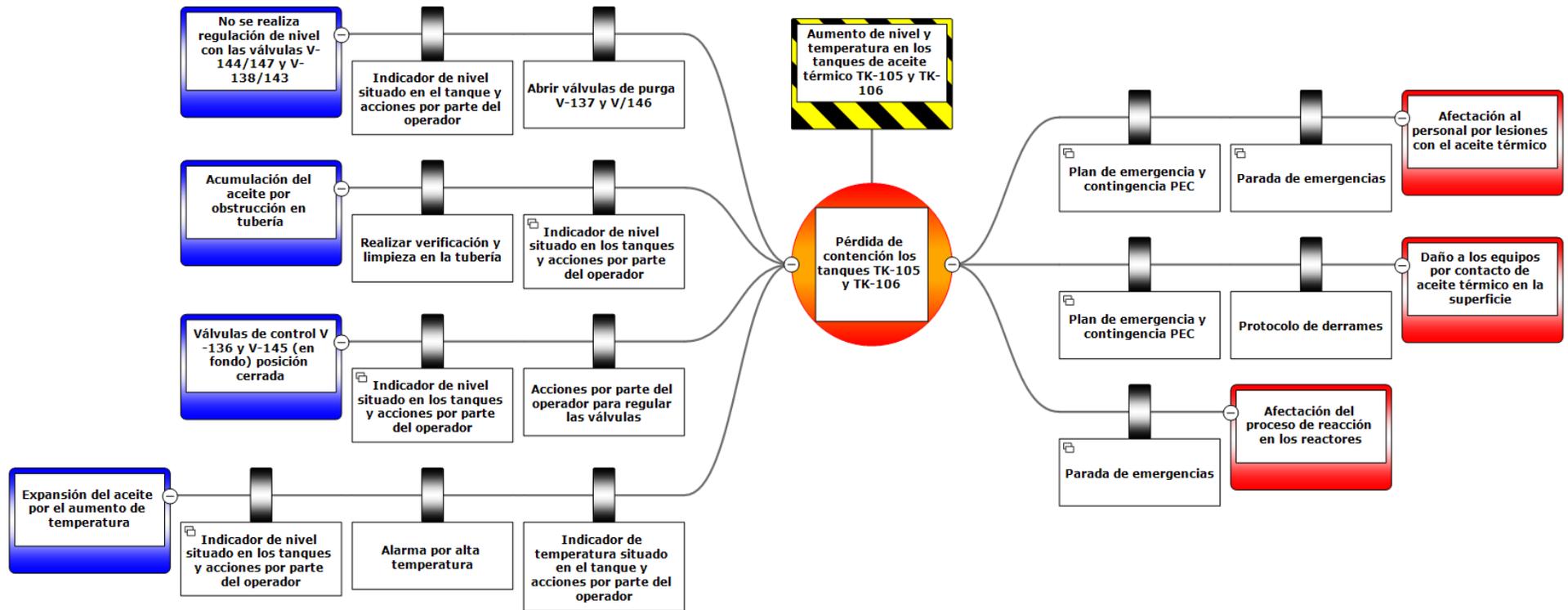
*Banco de reactores – Tanques de recolección de producto TK-103 y TK-104*



**Nota:** Corbatín – Tanques de recolección de producto TK-103 y TK-104.

**Figura 70.**

*Banco de reactores – Tanques de aceite térmico TK-105 y TK-106*

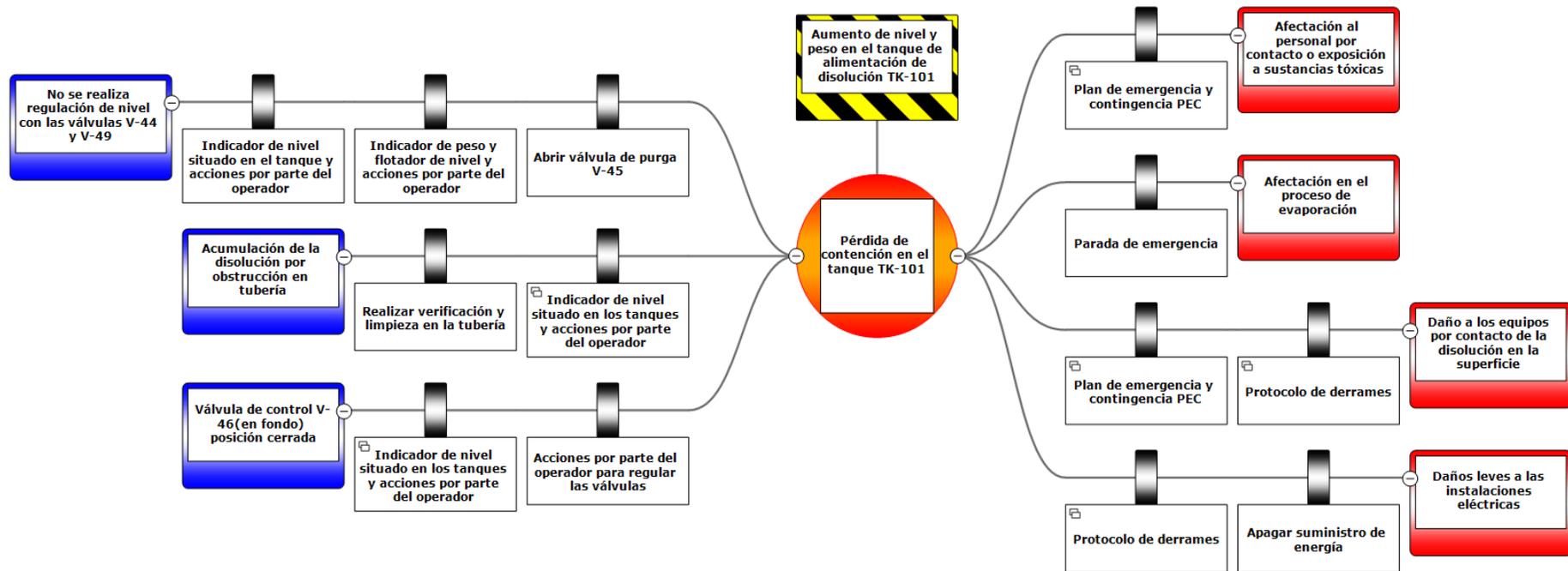


**Nota:** Corbatín – Tanques de aceite térmico TK-105 y TK-106.

## 4.2.2 Tren de evaporadores

Figura 71.

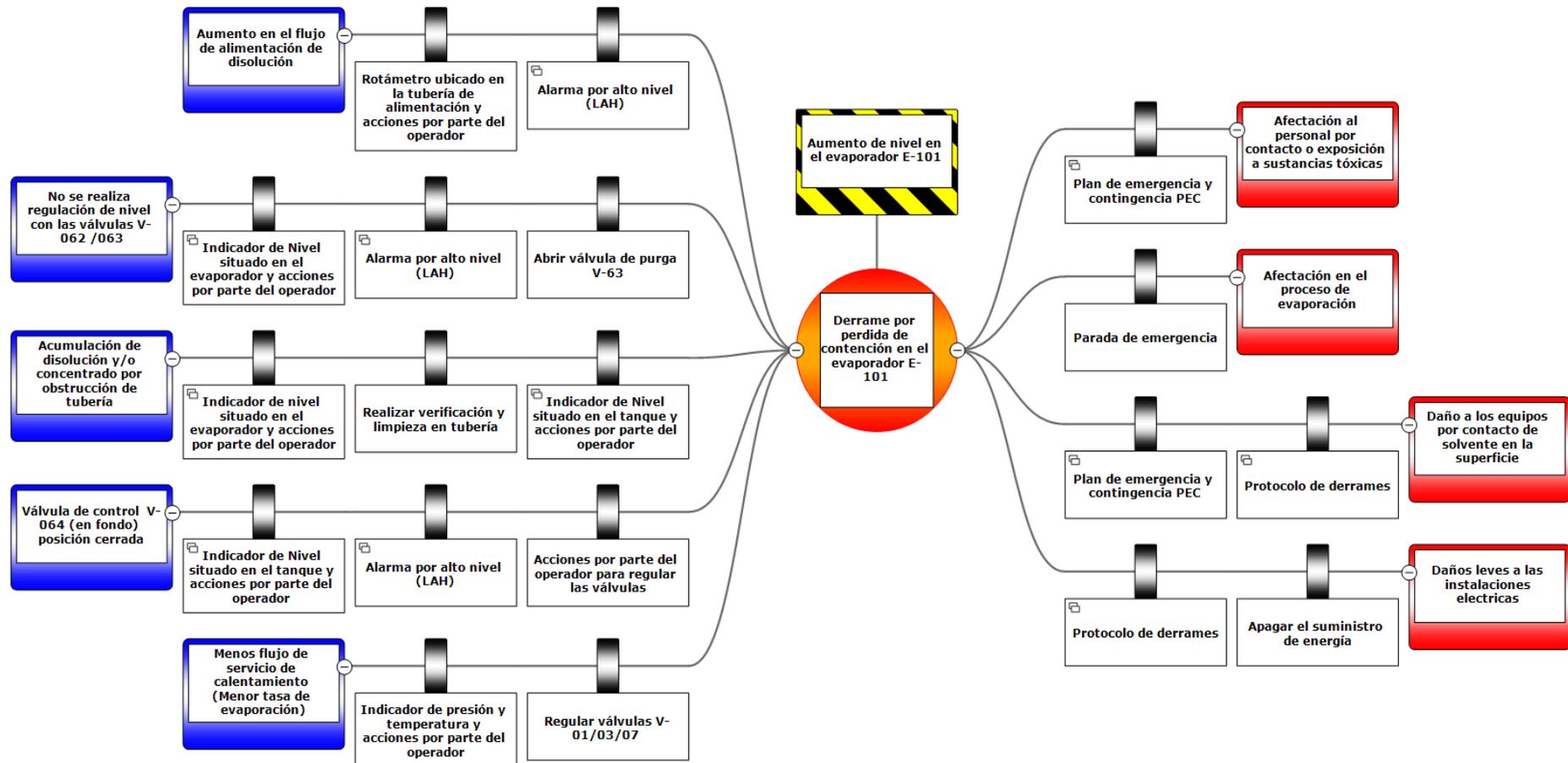
Tren de evaporadores – Tanque de alimentación TK-101



**Nota:** Corbatín – Tanque de alimentación TK-101.

**Figura 72.**

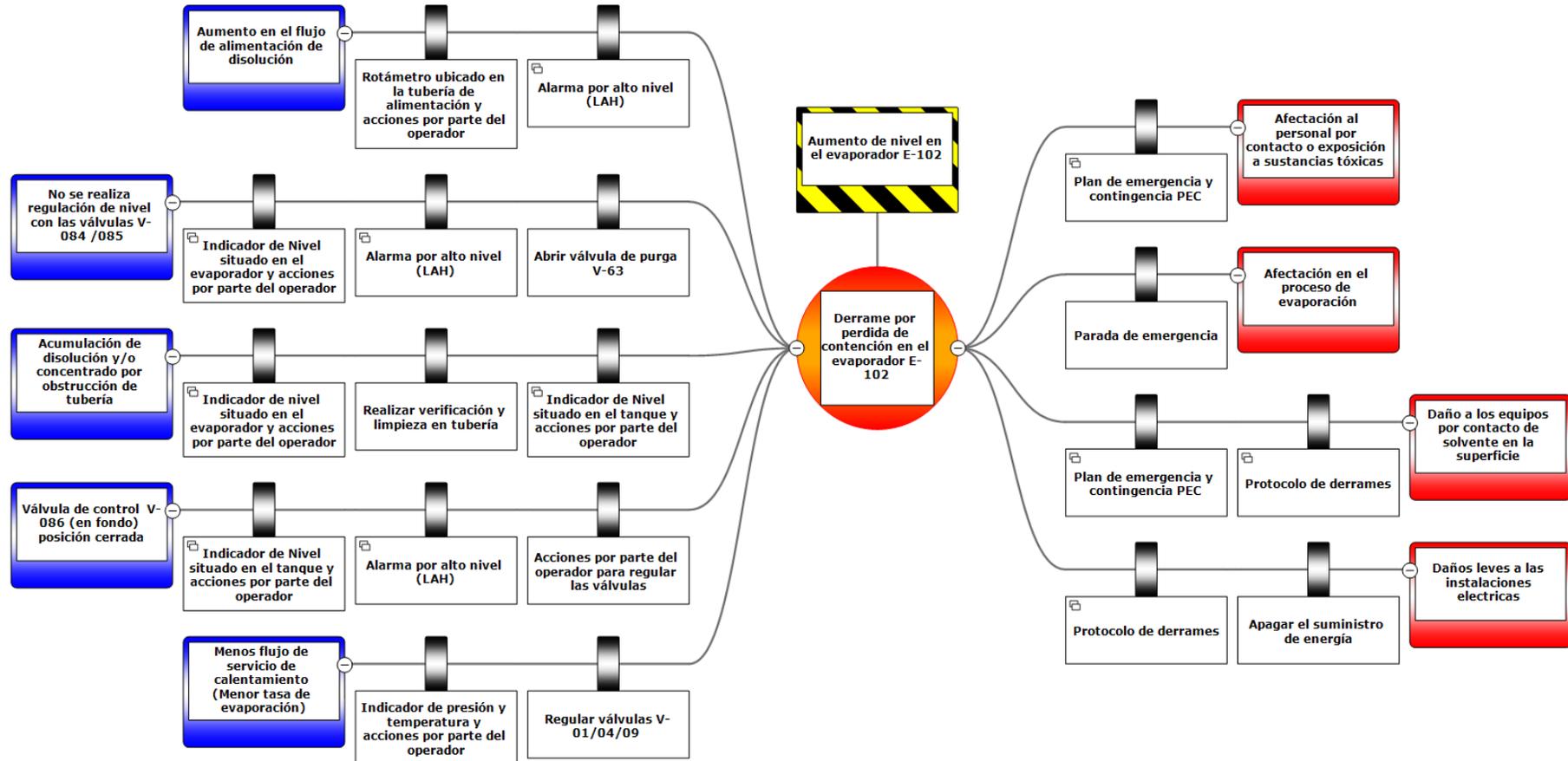
*Tren de evaporadores – Evaporador de tubos verticales E-101*



**Nota:** Corbatín – Evaporador de tubos verticales E-101.

**Figura 73.**

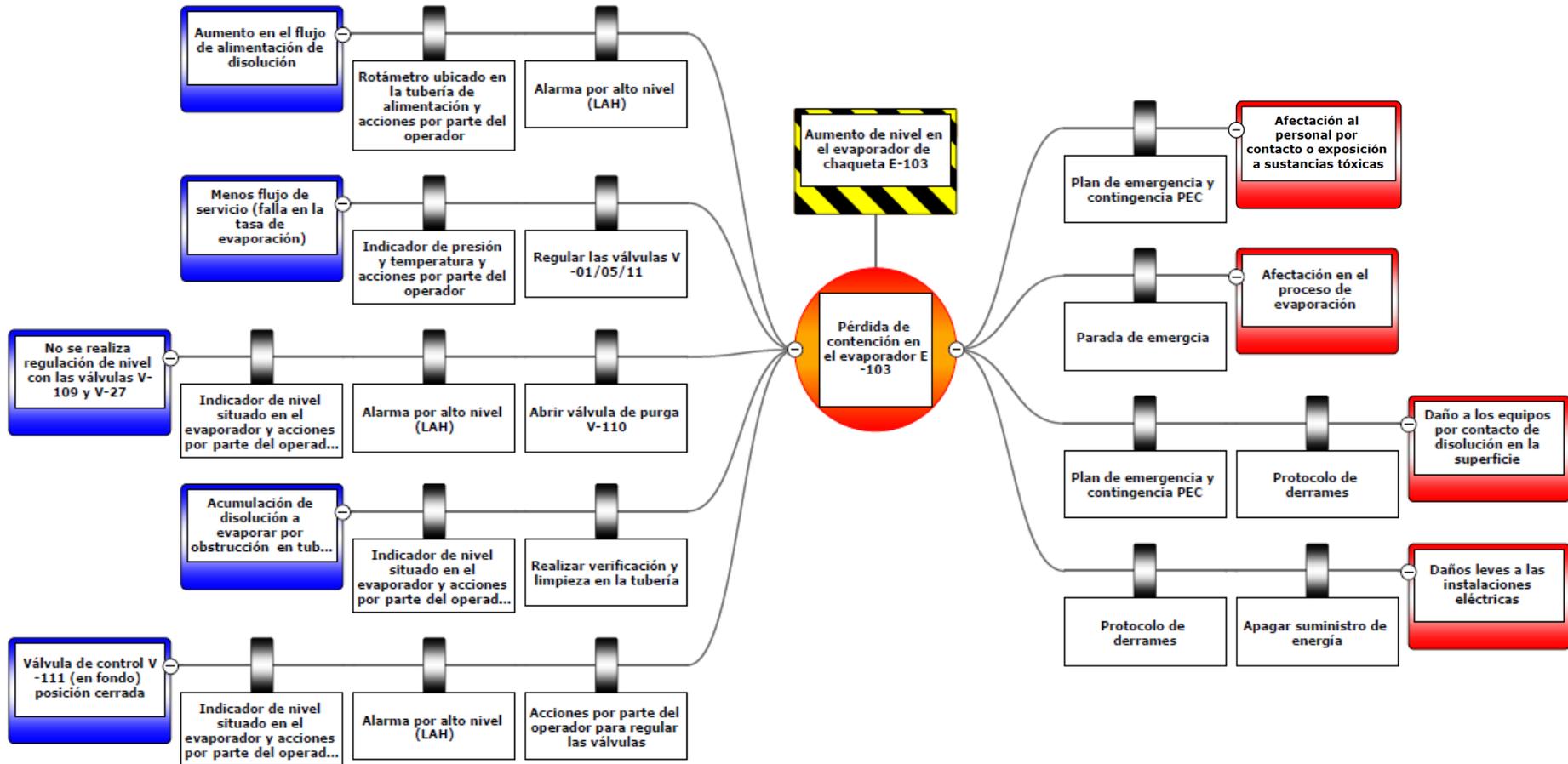
*Tren de evaporadores – Evaporador de tubos horizontales E-102*



**Nota:** Corbatín – Evaporador de tubos horizontales E-102.

Figura 74.

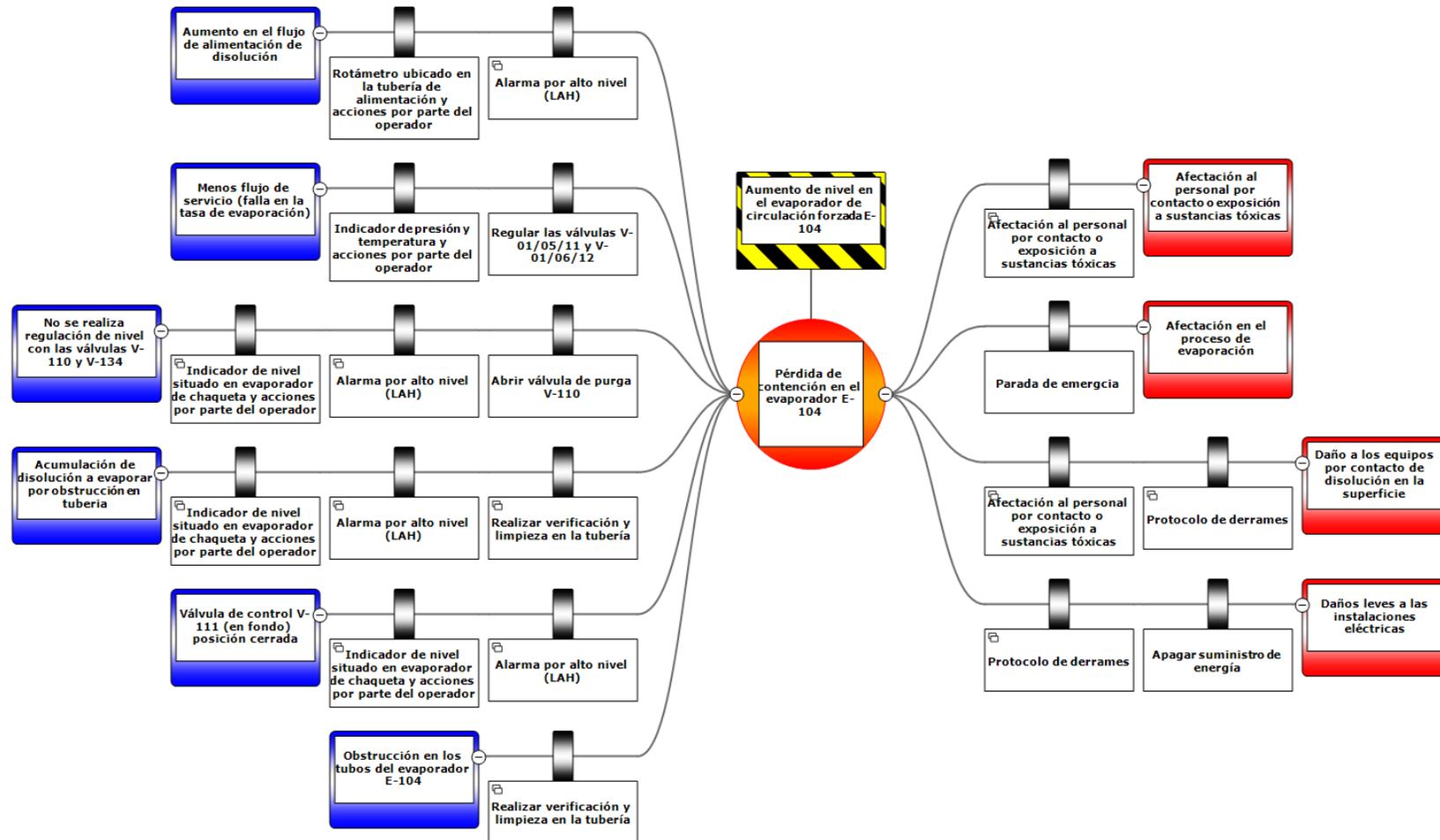
Tren de evaporadores – Evaporador de chaqueta E-103



Nota: Corbatín – Evaporador de chaqueta E-103.

Figura 75.

Tren de evaporadores – Evaporador de circulación forzada



Nota: Corbatín – Evaporador de chaqueta E-103.

### 4.3 Análisis de la metodología Bow-Tie

Concluido el estudio HAZOP para los equipos del CEPURE y CETA, se desarrolló la metodología Bow-Tie (corbatín), teniendo en cuenta las consecuencias que representaron una mayor valoración de riesgo según la matriz de valoración de riesgos operacionales (figura 6), cabe resaltar que los corbatines realizados son de nivel 1, ya que solo contienen, amenazas, barreras de mitigación y prevención, peligro, evento límite, consecuencias y no contemplan factores de degradación y acciones.

Por lo tanto, se obtuvo para la columna de destilación un total de 5 corbatines que involucran como evento límite, pérdida de contención en los tanques TK-101 y TK-102, afectación en el fluido debido a la pérdida de presión en los tubos del intercambiador, inundación en la columna de destilación C-101, goteo en la columna de destilación C-101 y ruptura y/o fuga en la tubería de la columna de destilación. Para el secador de bandejas se realizaron 2 corbatines cuyo evento límite es la afectación del material a secar y baja eficiencia en el proceso de secado.

Por otro lado, en la columna de absorción se contemplaron 4 corbatines que involucran la pérdida de contención en el tanque de alimentación TK-101, la inundación en la columna de absorción, ruptura de sellos, tubería o collar de soldadura en la columna y pérdida de contención en el tanque de solvente gastado TK-103. Para el extractor líquido-líquido y sólido -líquido se desarrollaron 5 corbatines, en los cuales el evento límite es la pérdida de contención del tanque de aceite térmico TK-101, pérdida de contención en el percolador, traspaso de material particulado a través de la malla de la canastilla del percolador, pérdida de contención del concentrador y pérdida de contención en el tanque recolector de solvente.

En el banco de reactores se obtuvo un total de 6 corbatines considerando la pérdida de contención en los reactores CSTR (R-101/102/102 (1L) y R-104 (3L)), pérdida de contención en los reactores PFR (R-105/106/107 (1L) y R-108 (3L)), pérdida de contención en el reactor PBR, pérdida de contención en los tanques de alimentación de reactivo TK-101 y TK-102, pérdida de contención en los tanques de recolección de producto TK-103 y TK-104 y pérdida de contención en los tanques de aceite térmico TK-105 y TK-106.

Finalmente, para el tren de evaporadores se realizaron 5 corbatines cuyo evento límite es la pérdida de contención en el tanque de alimentación TK-101, derrame por pérdida de contención en el evaporador E-101, derrame por pérdida de contención en el evaporador E-102, pérdida de contención en el evaporador E-103 y pérdida de contención en el evaporador E-104.

Finalizada la metodología, los corbatines realizados agrupan el plan de gestión propuesto para mitigar el riesgo en las zonas delimitadas de la planta piloto, ya que por medio de las barreras de prevención se evitará que se materialice el evento límite y de no ser así, las barreras de mitigación disminuirán las consecuencias, con el objetivo de disminuir la valoración del riesgo de medio a bajo. En caso tal de que una de las barreras falle, la barrera siguiente actuará en la mitigación y prevención; si todas las barreras fallan no es posible evitar el evento límite y las consecuencias.

Por último, cabe resaltar que no se realizó una valoración de las barreras de prevención y mitigación ya que no se encuentra contemplado en objetivos y está fuera del alcance proyectado para este trabajo.

## 5 CONCLUSIONES

Se identificaron las zonas dentro del centro de procesos e innovación para la industria sostenible (CEPIIS), las cuales son Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE) conformado por la columna de destilación, columna de absorción, secador de bandejas, extractor sólido-líquido y líquido-líquido; Centro de transformación y adecuación (CETA) conformado por el banco de reactores y tren de evaporadores. A estas zonas se les realizó inicialmente un análisis What if mediante el cual se identificaron los riesgos preliminares en cada uno de los equipos, cuyo desarrollo fue de gran importancia ya que permitió realizar un primer acercamiento con todo el equipo del CEPIIS y funcionó como base para el desarrollo del estudio HAZOP.

El análisis de riesgo HAZOP es una herramienta robusta al momento de realizar un análisis de riesgo y operabilidad, es por esta razón que el estudio se desarrolló de la manera más detallada posible considerando las desviaciones de los parámetros en la operación, causas consecuencias, salvaguardas y recomendaciones de cada equipo. Las principales consecuencias en los equipos están relacionadas con la pérdida de contención, riesgo de sobrecalentamiento en el motor de la bomba de alimentación y posible ruptura de eje, inundación de equipos por rebose no diseñados para soportar líquido y sobrepresión en el equipo que puede dar lugar a rupturas de sellos y tuberías.

Además, se realizó una valoración de riesgo con la matriz propuesta en el presente trabajo, que abarca las categorías de personas, economía, equipos, instalaciones, infraestructura y medio ambiente, y las probabilidades de rara, inverosímil, frecuente, verosímil y esperada, siendo fundamental puesto que permitió ubicar el riesgo en el nivel bajo, medio, alto y crítico.

De esta forma fue posible determinar los riesgos operacionales presentes en los equipos de cada zona, para posteriormente proponer recomendaciones como medidas de mitigación a las causas definidas en el HAZOP. La valoración de riesgo de las consecuencias en promedio se ubicó en un nivel medio y bajo lo cual representa que es posible establecer un plan de mejora para corregir y adoptar medidas que permitan reducir el riesgo en los nodos estudiados para cada equipo.

Algunas de las recomendaciones realizadas en la estructura del HAZOP son propuestas para implementar medidas de control que actualmente no se encuentran disponibles en los equipos, como por ejemplo alarmas por alto y bajo nivel, temperatura, flujo y presión, las cuales deben primero ser discutidas para ser implementadas, ya que representan un costo adicional en la adecuación del sistema de control en los equipos; estas recomendaciones se muestran de forma detallada en el anexo 3.

Por otro lado, los diagramas P&ID's y manuales de operación de los equipos brindados por los proveedores de PS+E fueron de gran importancia ya que son necesarios para realizar el análisis de las desviaciones operacionales.

En el desarrollo de la metodología Bow-Tie se consideraron las consecuencias con la valoración de riesgo más alta identificada en cada uno de los nodos del HAZOP para los equipos, obteniendo como producto un total de 5 corbatines para la columna de destilación, 2 para el secador, 4 para la columna de absorción, 5 para el extractor líquido-líquido y sólido-líquido, 6 para el banco de reactores y 5 para el tren de evaporadores, lo cuales conforman un total de 16 para el CEPURE y 11 para el CETA. Este conjunto de corbatines constituye el plan de gestión de riesgo para el Centro de procesos de la Universidad de América.

Los corbatines realizados representan una forma eficaz y sencilla de plasmar el riesgo más representativo de cada uno de los nodos analizados en el HAZOP, puesto que permite al personal entender de forma práctica las causas, barreras de prevención y mitigación, peligro, evento límite y consecuencias, que se puede presentar en la operación del equipo. De esta manera las personas encargadas del manejo de los equipos conocerán los posibles riesgos que se pueden materializar al presentarse una desviación en los parámetros de operación y sabrán qué medidas tomar para evitar o disminuir el escenario.

Finalmente, es necesario resaltar que la planta piloto actualmente se encuentra en la fase final de construcción y traslado de equipos al sitio, por lo que los equipos no están operando, y el análisis realizado es pre-operacional, ya que no se considera la puesta en marcha de los equipos. Además, el análisis se realizó para los equipos en modo de operación independiente, sin embargo, el centro de procesos tendrá en cuenta la conexión entre diferentes unidades de proceso, por lo cual es necesario ampliar el estudio realizado.

## 6 RECOMENDACIONES

En caso de que se realice algún cambio en los equipos estudiados en este documento, es necesario registrarlos en los diagramas de tuberías e instrumentación P&ID ya que son fundamentales para el análisis de riesgo y se debe actualizar el HAZOP. Por otra parte, si se adiciona algún otro equipo es necesario evaluar la realización de una modificación al estudio HAZOP o contemplar el desarrollo de un nuevo estudio HAZOP, para ello el equipo que conforma el estudio puede guiarse de los formatos e información desarrollada en este trabajo, como también será importante evaluar la posibilidad de implementar la gestión y control de cambios.

Por otro lado, se sugiere realizar los mantenimientos preventivos y correctivos en los instrumentos de medición y control, ya que puede reducir de manera significativa el riesgo en cada uno de los equipos. Además, al momento de poner en marcha los equipos, se recomienda realizar un seguimiento a las barreras de mitigación y prevención del corbatín propuestas, ya que estas pueden presentar afectaciones y debe realizarse una valoración de las mismas.

Así mismo, es importante realizar en futuras investigaciones un análisis de los equipos con sustancias específicas, para profundizar más en las causas, consecuencias y recomendaciones, ya que el estudio actual es general para todas las sustancias que manejan los equipos según el proveedor. También se recomienda realizar un análisis HAZOP y metodología Bow-Tie en los equipos del CPIIS que no fueron incluidos en este documento, puesto que es de gran importancia para el desarrollo adecuado del proceso.

Se debe contemplar la discusión de la implementación de ciertas medidas de control que actualmente no se encuentran disponibles en los equipos, como por ejemplo alarmas por alto y bajo nivel, temperatura, flujo y presión, ya que representan un costo adicional en la adecuación del sistema de control en los equipos

Finalmente, como se pudo observar en el presente documento, la seguridad de procesos y la gestión de riesgos es de suma importancia en el ámbito de la ingeniería química, razón por la cual se recomienda incluirla en el plan de estudios de la Universidad de América, ya que actualmente no se encuentra y se considera adecuada para el desarrollo de los profesionales.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Herrera-Galán, “Aplicación de la gestión de riesgo a equipos y sistemas productivos,” *DYNA (Colombia)*, vol. 84, no. 202, pp. 247–254, 2017, doi: 10.15446/dyna.v84n202.60863.
- [2] A. Anaya-Durand and H. Pedroza-Flores, “Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina,” 2008.
- [3] M. de Diaz Los Rios Liliana Aquino Agil, “Experimentación en plantas piloto,” *Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar*, 1996.
- [4] Center for Chemical Process Safety, *GUIDELINES FOR RISK BASED PROCESS SAFETY*. United States of America, 2007.
- [5] Energy Institute, “High level framework for process safety management.,” vol. 44, no. 0, p. 33, 2010.
- [6] “ISO 31000:2018, Gestión del riesgo — Directrices.” <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:31000:ed-2:v1:es> (accessed Oct. 15, 2021).
- [7] Y. Li and F. W. Guldenmund, “Safety management systems: A broad overview of the literature,” *Safety Science*, vol. 103. Elsevier B.V., pp. 94–123, Mar. 01, 2018. doi: 10.1016/j.ssci.2017.11.016.
- [8] Oscar. Bravo Mendoza, Marleny. Sánchez Celis, and H. Bravo Mendoza, *Gestión integral de riesgos*. Bravo & Sánchez, 2009.
- [9] C. Palma Rodríguez, “¿CÓMO CONSTRUIR UNA MATRIZ DE RIESGO OPERATIVO?,” *Universidad de Costa Rica*, 2011.
- [10] M. S. Maziah Munirah, Z. Libriati, Y. Nordin, and M. N. Norhazilan, “Prioritization of the human health and safety loss factor subject to offshore pipeline accidents,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Feb. 2019, vol. 220, no. 1. doi: 10.1088/1755-1315/220/1/012031.
- [11] Ministerio de Salud y Protección Social, “GUÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS, VALORACIÓN DE RIESGOS Y DETERMINACIÓN DE CONTROLES,” Bogotá, 2021.
- [12] Castañeda Macias Ernesto, “Evaluación de Riesgos de Proceso en Instalaciones Industriales,” *SURATEP*, 2001.
- [13] Rodriquez Diana, “ANÁLISIS DE RIESGOS DE OPERABILIDAD EN EL PROCESO CRÍTICO DE ALMACENAMIENTO DE NITRATO DE AMONIO LÍQUIDO DE UNA PLANTA PETROQUÍMICA EN LA ZONA INDUSTRIAL DE MAMONAL -CARTAGENA, MEDIANTE LA METODOLOGÍA HAZOP,” 2017.

- [14] ONSHORE SAFETY ALLIANCE (OSA), “How to Conduct a Risk Assessment Using the What-If Methodology,” 2021.
- [15] “What-if Analysis.” <https://institute.acs.org/lab-safety/hazard-assessment/ways-to-conduct/what-if-analysis.html#samples> (accessed Oct. 15, 2021).
- [16] V. Gupta and H. Y. Charan, “Hazard Operability Analysis (HAZOP): A Quality Risk Management tool”, [Online]. Available: [www.ich.org](http://www.ich.org).
- [17] Marlin Thomas, *Operability in Process Design*. 2014. [Online]. Available: [www.pc-education.mcmaster.ca](http://www.pc-education.mcmaster.ca)
- [18] P. Freedman, “HAZOP: Como metodología de análisis de riesgos,” 2003, Accessed: Apr. 04, 2022. [Online]. Available: <http://biblioteca.iapg.org.ar/archivosadjuntos/petrotecnica/2003-2/hazop.pdf>
- [19] REPSOL YPF, “GUÍA PARA LA REALIZACIÓN DE ESTUDIOS HAZOP (HAZard and OPerability analysis),” 2007.
- [20] F. T. B. Crawley, “HAZOP: Guide to Best Practice Guidelines to Best Practice for the Process and Chemical Industries,” 2015. Accessed: Apr. 04, 2022. [Online]. Available: <https://hsseworld.com/wp-content/uploads/2021/01/HAZOP-GUIDE-TO-BEST-PRACTICE-ICHEM-E-THIRD-EDITION.pdf>
- [21] L. P. De, P. de Pozos, A. Paliaras, C. P. Reyes, and Y. Sarabia Molina, “Código: 2937 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE BOW TIE PARA LA EVALUACIÓN DE SEGURIDAD EN.”
- [22] CCPS, “BOW TIES IN RISK MANAGEMENT,” London, 2018. [Online]. Available: [www.wiley.com](http://www.wiley.com).
- [23] Aiche, “BOW TIES IN RISK MANAGEMENT,” 2018. [Online]. Available: [www.wiley.com](http://www.wiley.com).
- [24] A. Muñoz, “Aplicación de la herramienta BOW-TIE para la identificación y gestión de los riesgos en instalaciones de procesos,” 2021. Accessed: Apr. 04, 2022. [Online]. Available: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/72119/fichero/TFM-2119+MU%C3%91OZ+ARJONA%2C+ANDR%C3%89S.pdf>
- [25] Equipo CEPIIS, “Renders Centro de procesos de innovación para la industria sostenible (CEPIIS),” *Fundación Universidad de América*. 2022.
- [26] Yan Chota Castillo, “SIMULACIÓN DE PROCESOS QUÍMICOS - Diseño, simulación y optimización,” 2014. <http://processimulation.blogspot.com/2014/> (accessed Mar. 28, 2022).
- [27] PSE, “Manual de operación Planta de destilación continua,” vol. 01. 2018.

- [28] “PRODUCTOS Y SERVICIOS |PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT.” <https://andreaorjuela.wixsite.com/website/productos-y-servicios> (accessed Jun. 06, 2022).
- [29] Fernández Gemán, *Bases: Ingeniería Química*, vol. 1.
- [30] Gunt Hamburg, “Ingeniería de procesos térmicos-Absorción y adsorción.” Accessed: Apr. 06, 2022. [Online]. Available: [https://www.gunt.de/images/download/absorption\\_spanish.pdf](https://www.gunt.de/images/download/absorption_spanish.pdf)
- [31] PSE, “MANUAL DE OPERACIÓN PLANTA DE ABSORCIÓN,” 2018.
- [32] S. Carlos and A. B. Fica, “Tipos de Operaciones Unitarias Operaciones Unitarias,” España , 2009.
- [33] PSE, “MANUAL DE OPERACIÓN SECADOR DE BANDEJAS,” 2018.
- [34] Eloy Galvez Condori, “Diseño de una secadora de quinua en el departamento de la Paz - Bolivia,” La paz - Bolivia, 2016.
- [35] Gómez Marisa Fito Pedro Seguí Lucía Betoret Noelia, *Fundamentos de la Extracción Sólido-Líquido*.
- [36] PSE, “MANUAL DE OPERACIÓN PLANTA DE EXTRACCIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO Y LÍQUIDO-LÍQUIDO,” 2018.
- [37] “Extracción líquido/líquido | De Dietrich Process Systems.” <https://www.dedietrich.com/es/soluciones-y-productos/extraccion/extraccion-liquido/liquido> (accessed Apr. 06, 2022).
- [38] “Extracción líquido/líquido | De Dietrich Process Systems.” <https://www.dedietrich.com/es/soluciones-y-productos/extraccion/extraccion-liquido/liquido> (accessed Jun. 09, 2022).
- [39] PSE, “MANUAL DE OPERACION BANCO DE REACTORES,” 2018.
- [40] I. López and L. Borzacconi, “Introducción al diseño de reactores,” 2009.
- [41] Roberto Carrizales Martínez, “CÁLCULO DE EVAPORADORES DE MÚLTIPLE EFECTO, UN MÉTODO SIMPLIFICADO,” *Universidad Autónoma de San Luis Potosí*. <https://www.eumed.net/rev/tlatemoani/02/rcm.htm> (accessed Apr. 03, 2022).
- [42] PSE, “MANUAL DE OPERACIÓN TREN DE EVAPORACIÓN,” 2018.
- [43] Vikneswara Jayamaran, Anna Lvova, Qian Ying Ooi, Jia Wei Chong, and Yousra Hassan, “Hazard and Operability Study (HAZOP) Safety Assessment on Formaldehyde Production Plant,” 2002.
- [44] Rafael Bosh, “Planta de producción de HCOOH - Seguridad e higiene,” *AFOR - Universidad autónoma de Barcelona*, 2016.

- [45] Enoch Israel Vega Aguillón, “Análisis de escenarios de riesgo en la planta endulzadora ‘U-502’ de la refinería Francisco I. Madero utilizando HYSYS dinámico,” Tecnológico Nacional de México, Tamaulipas, México, 2015.
- [46] Daniel Alcón Álvarez, “Diseño e implantación de sistema de seguridad industrial para una columna de rectificación para la concentración de ácido fluorhídrico,” Universidad de Cádiz, 2011.
- [47] Jhon Antony Pabón Beltran, “PLANTEAMIENTO METODOLOGICO PARA EL DIAGNOSTICO DE LA PLANTA DE SECADO BAJO LAS CONDICIONES DE DISEÑO ESTABLECIDAS POR EL FABRICANTE,” Fundación Universidad de América, Bogotá D.C., 2019.
- [48] Widtha Samarakoon, “Detailed design of a single effect evaporator with thermal vapor re compression,” University of Moratuwa, 2016. doi: 10.13140/RG.2.2.23174.78400.
- [49] OHSAS Project Group., *Occupational health and safety management systems : requirements*. OHSAS Project Group, 2007.
- [50] “RESPEL - IDEAM.” <http://www.ideam.gov.co/web/sia-cifras/respel> (accessed Jun. 09, 2022).

## **ANEXOS**

### **ANEXO 1. WHAT IF**

Como herramienta preliminar para el desarrollo del trabajo junto con el Centro de procesos e innovación para la industria sostenible (CEPIIS) se elaboró la herramienta de análisis de riesgo What If para las zonas identificadas: Centro de purificación y refinación de producto (CEPURE) en el cual se evaluó el riesgo en la columna de destilación, columna de absorción, secador de bandejas, extractor sólido-líquido y líquido-líquido; Centro de transformación y adecuación (CETA) en el cual se evaluó el riesgo en el banco de reactores y tren de evaporadores.

Adicionalmente se realizó el análisis what if para la planta de tratamiento de aguas, el laboratorio de procesos biológicos, el sistema de bombeo y red de aguas de emergencia y los riesgos asociados a la generación de residuos o desechos peligrosos, el cual hace parte del instrumento de gestión de información “RESPEL” mediante el cual se captura información normalizada, homogénea, sistemática sobre la generación y el manejo de residuos o desechos peligrosos, originados por las diferentes actividades productivas en la planta piloto. [50]

Cabe resaltar que el What if realizado fue útil como base para la elaboración del HAZOP en este trabajo. El documento se encuentra disponible en Google drive y se puede acceder a él por medio del vínculo adjunto o el código QR que se muestra a continuación.

**Figura 76.**

*Código QR del What If realizado para el centro de proceso de la Universidad de América*



**Nota:** Al escanear el código QR se tendrá acceso al What if realizado para el Centro de procesos para la universidad de América, que también es también se encuentra disponible en el siguiente enlace adjunto. <https://docs.google.com/spreadsheets/d/10fq1goeukicw74dzrRiTQ2OLpA602jZD/edit?usp=sharing&oid=112451705371004476069&rtpof=true&sd=true>.

## ANEXO 2. HAZOP

Si se requiere realizar una modificación del HAZOP debido cambios en los equipos, o alguna modificación externa realizada, se deja a disposición los formatos empleados en este trabajo, de ser utilizados es indispensable citar a los autores.

**Figura 77.**

*Código QR del Formato HAZOP realizado para el CEPIIS*



**Nota:** Al escanear el código QR se tendrá acceso al HAZOP realizado para el Centro de procesos para la universidad de América, que también es también se encuentra disponible en el siguiente enlace adjunto.  
<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1C43VmpA08-4gXkPJ0AEqSc3fyiyNqELO/edit?usp=sharing&ouid=112451705371004476069&rtpof=true&sd=true>.

### ANEXO 3. COMPATIBILIDAD DE SUSTANCIAS EN LOS EQUIPOS

**Tabla 32.** *Tabla de compatibilidad de sustancias para los equipos propuestos por PSE*

Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflón (PTFE)	Viton	EPDM
Aceite de coco	A	A	A	D
Aceite de maíz	B	A	B	C
Aceite de motor	A	A	N/A	D
Aceite de oliva	B	A	A	D
Aceite de palma	A	A	A	A
Aceite hidráulico (petro)	A	A	A	D
Aceite hidráulico (sintético)	A	A	A	D
Aceite mineral	A	A	A	D
Aceites combustibles	A	B	B	D
Acetaldehído	E	A	D	A
Acetato de amilo	A	A	D	A
Acetato de isoamilo	A	N/A	D	B
Acetato de isobutilo	A	N/A	D	C
Acetato de isopropilo	C	A	D	B
Acetato de metilo	A	A	D	C
Acetato de sodio	B	A	D	A
Acetato de vinilo	B	A	D	B
Acetileno	A	A	A	A
Acetona	A	A	D	A
Ácido acético	D	A	B	A
Ácido acético 20%	B	A	B	A
Ácido acético 80%	D	A	B	A
Ácido acético glacial	C	A	D	B
Ácido benzoico	B	A	A	D
Ácido carbónico	B	A	A	B
Ácido cítrico	B	A	A	A

Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflón (PTFE)	Viton	EPDM
Ácido cítrico 5%	A	A	A	A
Ácido clórico	D	A	N/A	N/A

Ácido clorhídrico 100%	D	A	A	D
Ácido clorhídrico 20%	D	A	A	A
Ácido clorhídrico 37%	D	A	A	C
Ácido cloroacético	D	A	D	B
Ácido clorosulfónico	D	A	D	D
Ácido crómico 5%	B	A	A	A
Ácido crómico 50%	C	A	A	B
Ácido esteárico	B	A	A	B
Ácido fórmico	C	A	C	A
Ácido fosfórico 10%	A	A	A	A
Ácido fosfórico 20%	A	A	A	A
Ácido fosfórico 50%	A	A	A	B
Ácido fosfórico concentrado	A	A	A	B
Ácido ftálico	B	A	B	A
Ácido láctico	B	A	A	A
Ácido láctico (Solución al 5%)	A	A	A	A
Ácido linoleico	B	A	B	D
Ácido monocloroacético	D	D	C	C
Ácido nítrico concentrado	A	A	A	D
Ácido nítrico 5-10%	A	A	A	B
Ácido nítrico 20%	A	A	A	B
Ácido nítrico 50%	B	A	A	D
Ácido oleico (red oil)	B	A	B	B
Ácido oxálico 5% (caliente y frío)	B	A	A	A
Ácido oxálico frío	D	A	A	A
Ácido palmítico	B	A	A	B
Ácido perclórico	D	A	A	B
Ácido salicílico	B	A	A	A
Ácido sulfúrico 95%	A	A	A	C
Ácido sulfúrico 75%	C	A	A	C
Ácido sulfúrico 60%	D	A	A	C
Ácido sulfúrico 50%	D	A	A	B
Ácido sulfúrico 25%	B	A	A	

Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflón (PTFE)	Viton	EPDM
Ácido sulfúrico 10%	A	A	A	A

Ácido sulfúrico <10%	D	A	A	A
Ácido sulfúrico concentrado(frío)	C	A	B	C
Ácido sulfúrico concentrado (caliente)	D	A	A	D
Ácido úrico	B	A	N/A	N/A
Ácidos grasos	B	A	A	D
Agua carbonatada	A	N/A	A	N/A
Agua de mar	C	A	A	A
Agua desionizada	A	A	A	A
Agua destilada	A	A	A	A
Agua Regia (80% HCl, 20% HNO3)	D	A	C	C
Alcohol amílico	A	A	A	A
Alcohol bencílico	B	A	A	B
Alcohol isobutílico	A	A	A	A
Almidón	B	A	A	B
Aminas	A	A	D	C
Amoniaco 10%	A	A	D	A
Amoniaco, líquido	N/A	A	D	A
Anhídrido ftálico	A	A	A	A
Azúcar (líquidos)	A	A	A	A
Benceno	B	A	A	D
Benzaldehído	B	A	D	B
Benzoato de sodio	N/A	A	A*	A
Bicarbonato de potasio	B	A	A	A
Bicarbonato de sodio	A	A	A	A
Bisulfito de sodio	D	A	A	A
Borax	B	A	A	A
Butano	A	A	A	D
Butanol	A	A	A	B
Buteno	A	N/A	A	D
Café	A	N/A	A	A
Carbonato de calcio	B	A	A	A
<i>Carbonato de magnesio</i>	B	A	A	C

Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflón (PTFE)	Viton	EPDM
Carbonato de sodio	A	A	A	N/A

Cetonas	A	A	N/A	A
Ciclohexano	B	A	A	D
Clorobenceno	A	B	A	D
Cloroformo	A	A	A	D
Coca cola	A	A	N/A	A
Colorantes	A	N/A	A	N/A
Detergentes	A	A	A	A
Dicromato de potasio	B	A	A	A
Diésel	A	A	A	D
Dietil éter	B	A	D	D
Dietilamina	A	D	A	B
Dietilenglicol	A	A	A	A
Difenilo	B	A	A	D
Dimetil formamida	A	A	C	B
Dióxido de azufre	D	A	A	B
Estireno	A	A	B	D
Etanol	A	A	A	A
Etanolamina	A	A	D	B
Éter de petróleo	A	D	D	A
Éter de isopropilo	A	A	D	D
Etil acetato	B	A	D	B
Etil éter	B	A	D	D
Etilenglicol	B	A	A	A
Fenol	B	A	A	N/A
Formaldehido 100%	B	A	D	A
Formaldehido 40%	A	A	A	A
Furfural	A	A	D	D
Gasolina	A	A	A	D
Gelatina	A	A	A	A
Glicerol	A	A	A	A
Glucosa (jarabe de maíz)	A	A	A	A
Heptano	A	A	A	D
Hexano	A	A	A	D
<i>Hidroquinona</i>	B	A	B	D

Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflón (PTFE)	Viton	EPDM
Hidrosulfito de sodio	N/A	A	A	B

Hidróxido de calcio 10% (en ebullición)	A	N/A	A	A
Hidróxido de magnesio	B	A	A	A
Hidróxido de potasio	B	A	B	A
Hipoclorito de sodio <20%	C	A	A	B
Hidróxido de sodio 20%	B	A	C	N/A
Hidróxido de sodio 50%	B	A	D	B
Hidróxido de sodio 80%	D	A	D	B
Hipoclorito de sodio 100%	D	A	A	B
Isobutanol	A	A	A	N/A
Isooctano	A	A	A	D
Isopropanol	B	A	A	B
Jet Fuel (JP3, JP4, JP5)	A	A	A	D
Jugo de caña	A	A	A	A
Jugos de frutas	A	A	A	N/A
Lacas	A	A	A	D
Látex	A	A	A	A
Leche	A	A	A	A
Licor de azúcar de caña	A	A	A	A
Líquidos de remolacha	A	A	A	A
Lubricantes	A	A	A	D
Melaza	A	A	A	A
Metanol	A	A	C	A
Metasilicato de sodio	A	A	A	A
Metil butil cetona	A	N/A	D	B
Metil etil cetona	A	A	D	A
Metil isobutil cetona	B	A	D	C
Metil isopropil cetona	A	A	D	C
Metilamina	A	A	D	A
Miel	A	A	A	A
Monoetanolamina	A	A	D	B
Nafta	A	B	A	D
Naftalina	A	A	A	D
Nitrato de calcio	C	A	A	B
<i>Nitrato de sodio</i>	B	A	A	A

Sustancia química	Compatibilidad			
	SS 304	Teflón (PTFE)	Viton	EPDM
Nitrobenceno	B	A	B	D

Óxido de calcio	A	A	B	A
Óxido de magnesio	A	A	C	N/A
Pentano	C	A	A	D
Permanganato de potasio	B	A	A	A
Peróxido de hidrógeno 100%	B	A	A	D
Peróxido de hidrógeno 50%	B	A	A	B
Peróxido de hidrógeno 30%	B	A	A	B
Peróxido de hidrógeno 10%	B	A	A	A
Peróxido de sodio	B	A	A	A
Piridina	B	A	D	B
Propano (licuado)	A	A	A	D
Propanol	A	A	A	N/A
Propilenglicol	B	A	A	A
Propileno	B	A	A	D
Queroseno	A	A	A	D
Sulfato de calcio	B	A	A	A
Sulfato de magnesio	A	A	A	A
Sulfato de potasio	B	A	A	A
Sulfato de sodio	B	A	A	A
Sulfato de zinc	B	A	A	A
Tintas	C	A	A	A
Tiosulfato de sodio	B	A	A	A
Tolueno (toluol)	A	A	C	D
Trietilamina	A	A	D	A
Urea	B	A	A	A
Vinagre	B	A	A	A
Xileno	B	A	B	D
<i>Yodo</i>	D	A	A	B

\* Satisfactorio hasta 22°C

## ANEXO 4. RECOMENDACIONES DE IMPLEMENTACIÓN DE EQUIPOS

Debido a que en el análisis de riesgo HAZOP aplicado en los diferentes equipos se propusieron ciertas recomendaciones de equipos de instrumentación que actualmente no están presentes en el diseño de los mismos, se realizó una tabla con esta información para ser analizada por las personas encargadas del CEPIIS y ver su viabilidad de aplicación ya que representan ciertos costos adicionales en los equipos.

**Tabla 33.** Requerimientos de salvaguardas en los equipos del CEPURE y CETA

Equipo	Nodo	Salvaguardas
	Tanques de almacenamiento de reactivos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por alto nivel (LAH) y bajo nivel (LAL)</li> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH) y baja presión (PAL)</li> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH) y por baja temperatura (TAL)</li> </ul>
	Intercambiadores de calor	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar un indicador de flujo en la entrada del intercambiador</li> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH) y baja presión (PAL)</li> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH) y por baja temperatura (TAL)</li> </ul>
Columna de destilación	Entrada a la columna (alimentación)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar un indicador de flujo en la entrada de la columna</li> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH) y por baja temperatura (TAL)</li> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH) y baja presión (PAL)</li> <li>- Implementación de válvulas de alivio o disco de rotura para liberar presión y evitar explosión en alguna zona del equipo</li> </ul>
	Cima de la columna	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar un indicador de flujo en la tubería del reflujo</li> <li>- Implementar indicador de flujo en la corriente del condensador y del rehervidor</li> </ul>
	Fondos de la columna	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar un indicador de flujo a en la entrada que conecta al rehervidor desde el fondo de la columna</li> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH) y baja presión (PAL)</li> </ul>

Secador de bandejas	Secador de bandejas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar un indicador de flujo a la entrada del ducto, después del ventilador centrífugo</li> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH) y por baja temperatura (TAL)</li> </ul>
	Tanque de fluido calefactor	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar un indicador de flujo y/o válvula de control en la tubería referente a la recirculación del aceite</li> <li>- Implementar alarmas por alto nivel (LAH) y bajo nivel (LAL)</li> </ul>
Extracción Sólido-Líquido y Líquido-Líquido	Percolador	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar indicadores de flujos a la entrada y salida del flujo en el percolador</li> <li>- Implementar un indicador de flujo en la tubería referente a la recirculación y alimentación del solvente</li> <li>- Implementar un indicador de nivel en el percolador</li> <li>- Implementar un indicador de presión en el percolador</li> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH) y por baja temperatura (TAL)</li> </ul>
	Concentrador	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar un indicador de flujo en la tubería referente a la recirculación del solvente</li> <li>- Implementar un indicador de flujo a la salida del percolador</li> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH) y por baja temperatura (TAL)</li> </ul>
	Tanques colectores de solvente	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar un indicador de flujo en la tubería referente a la recirculación del solvente</li> <li>- Implementar alarmas por alto nivel (LAH) y bajo nivel (LAL)</li> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH) y por baja temperatura (TAL)</li> </ul>
	Tanque de solvente fresco	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar un indicador de flujo en la tubería referente a la recirculación del solvente</li> <li>- Implementar alarmas por alto nivel (LAH) y bajo nivel (LAL)</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH) y por baja temperatura (TAL)</li> </ul>
	Compresor y humidificador de aire	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH) y por baja temperatura (TAL)</li> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH) y baja presión (PAL)</li> <li>- Implementar un indicador de flujo en las corrientes de entrada al equipo</li> </ul>
	Columna	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar un indicador de temperatura a la entrada del gas a absorber</li> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH) y por baja temperatura (TAL)</li> <li>- Implementar un indicador de flujo a la entrada de la columna tanto a la entrada de gas como de solvente</li> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH) y baja presión (PAL)</li> </ul>
	Tanque de solvente gastado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar un indicador de flujo en la tubería referente a la entrada del solvente gastado en el tanque</li> <li>- Implementar alarmas por alto nivel (LAH) y bajo nivel (LAL)</li> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH) y por baja temperatura (TAL)</li> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH) y baja presión (PAL)</li> </ul>
Banco de reactores	Reactores CSTR	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar indicadores de flujo en los tramos de alimentación al reactor</li> <li>- Implementar alarmas por alto nivel (LAH) y bajo nivel (LAL)</li> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH) y por baja temperatura (TAL)</li> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH) y baja presión (PAL)</li> </ul>
	Reactores PFR	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar indicadores de flujo en los tramos de alimentación al reactor</li> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH) y por baja temperatura (TAL)</li> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH) y baja presión (PAL)</li> </ul>

	Reactor PBR	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar indicadores de flujo en los tramos de alimentación al reactor</li> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH) y por baja temperatura (TAL)</li> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH) y baja presión (PAL)</li> </ul>
	Tanques de alimentación de reactivos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por alto nivel (LAH) y bajo nivel (LAL)</li> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH) y baja presión (PAL)</li> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH) y por baja temperatura (TAL)</li> </ul>
	Tanques de recolección de productos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por alto nivel (LAH) y bajo nivel (LAL)</li> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH) y baja presión (PAL)</li> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH) y por baja temperatura (TAL)</li> </ul>
	Tanques de fluido calefactor	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar un indicador de flujo y/o válvula de control en la tubería referente a la recirculación del aceite</li> <li>- Implementar alarmas por alto nivel (LAH) y bajo nivel (LAL)</li> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH) y baja presión (PAL)</li> </ul>
Tren de evaporadores	Evaporador de tubos verticales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar un indicador de flujo en la entrada del vapor de servicio en el equipo</li> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH) y baja presión (PAL)</li> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH) y por baja temperatura (TAL)</li> </ul>
	Evaporador de tubos horizontales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar un indicador de flujo en la entrada del vapor de servicio en el equipo</li> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH) y baja presión (PAL)</li> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH) y por baja temperatura (TAL)</li> </ul>
	Evaporador de chaqueta	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar un indicador de flujo en la entrada del vapor de servicio en el equipo</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH) y baja presión (PAL)</li> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH) y por baja temperatura (TAL)</li> </ul>
Evaporador de circulación forzada	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar un indicador de flujo en la entrada del vapor de servicio en el equipo</li> <li>- Implementar alarmas por alta presión (PAH) y baja presión (PAL)</li> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH) y por baja temperatura (TAL)</li> </ul>
Tanque de almacenamiento de dilución	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar un indicador de presión</li> <li>- Implementar alarmas por alta temperatura (TAH) y por baja temperatura (TAL)</li> <li>- Implementar alarmas por alto o bajo peso</li> </ul>

## ANEXO 5. PLAN DE GESTIÓN DE RIESGOS

Como síntesis de este trabajo se realizó un documento del plan de gestión del riesgo que contiene la información más relevante desarrollada en este trabajo, la cual será útil a manera informativa para el personal, docentes y estudiantes del centro de procesos e innovación para la industria sostenible (CEPIIS) de la Universidad de América.

**Figura 78.**

*Plan de Gestión de Riesgo CEPIIS*



**Nota:** Al escanear el código QR se tendrá acceso Plan de Gestión de riesgo realizado para el Centro de procesos para la universidad de América, que también es también se encuentra disponible en el siguiente enlace adjunto. [https://drive.google.com/file/d/14\\_wMQkTjH095lXeeAFXxFaDJkmEcNjIG/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/14_wMQkTjH095lXeeAFXxFaDJkmEcNjIG/view?usp=sharing).