

Diagnóstico y análisis de riesgos como estrategia para la mitigación de fallas en la seguridad del  
proceso de hidrotratamiento en la unidad Catatest II del CICAT – UIS

Paula Andrea Mendoza Delgado

Sebastián Ruiz Mahecha

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero(a) Químico(a)

Director

Edgar Mauricio Morales Valencia

Doctor en Ingeniería Química

Codirectora

Diana Paola Duarte Duarte

Doctora en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas  
Escuela de Ingeniería Química  
Bucaramanga

2026

### **Dedicatoria**

#### *Agradecimientos de Sebastián*

*A mí mismo, como un reconocimiento a mi propia perseverancia y a ese Sebastián que, ante las tormentas y contratiempos, demostró de qué está hecho y probó su verdadera capacidad; dedico este logro, asimismo, a mi familia, especialmente a mis padres, Olga y Leopoldo, y a mis hermanas, Karen y Natalia, por ser mi raíz en la distancia y por mantener una fe ciega en mí desde el primer día, sabiendo siempre que sería capaz de lograrlo, así como a mis primos, Santiago, Esteban y Juanita, por ser parte de esa base incondicional. Sin embargo, este camino no lo recorrí solo, por lo que se lo dedico a mi amada amiga Paw, gracias por ser mi impulso constante, por hacerme ver mis fortalezas y abrazar mis flaquezas, pues en una ciudad ajena donde no es fácil sentir respaldo, tú y tu familia me brindaron un hogar sincero y una mesa cálida. De igual manera, a mi hermosa, incomparable e incondicional Sabrina, mi mascota adorada que es como mi hija, gracias por tu compañía silenciosa pero eterna, por estar a mi lado en cada noche de desvelo y por darme ese apoyo puro que hizo que jamás me sintiera solo en este camino, y finalmente, a mis amigos de siempre: Tatán, Lala, Alann, Sofify, DM, Dani Castro, Fred, Pipe, Martín, Jenn, Solano y Cris, por cada palabra de aliento y ese shot anímico diario para afrontar la rutina, ya que este triunfo es el reflejo de mi propia voluntad y del apoyo de quienes me sostuvieron; a mí por resistir, y a ustedes por no dejarme caer.*

*– Sebastián Ruiz Mahecha*

#### *Agradecimientos de Paula*

*Quiero empezar esta dedicatoria agradeciendo a Dios por enseñarme a creer y por darme a personas tan fundamentales en mi vida como lo es mi mami María Nelcy, a quien también dedico este logro y de quien me siento profundamente agradecida, gracias mami por ser*

*mi apoyo incondicional, por acompañarme con tu cariño y cuidado en forma de atenciones y fruticas en las largas horas resolviendo ecuaciones, gracias por consentirme siempre y por enseñarme con tu ejemplo el significado más puro y verdadero del amor, la nobleza y la entrega. Con mucho amor, agradezco también a mi papi Isnardo, cada día me parezco más a tí.. gracias por ser mi ejemplo de perseverancia, disciplina y esfuerzo, gracias papi por estar y por ayudarme siempre. Así mismo quiero agradecer a mi hermanita Kelly por ser mi mejor amiga y mi compañera eterna, gracias por siempre saber ponerme los pies sobre la tierra con tu amor incondicional y guía. Kelly, haz dejado una huella muy profunda en mi vida, llevo conmigo tus palabras y tu ejemplo a donde quiera que vaya. Mami, Papi y Kelly, todo lo que soy es por ustedes.*

*Siguiendo con la emotividad que expone en mí este gran logro, quiero agradecer especialmente a mi novio Leo, desde aquellos días juntos en la universidad en los que me explicabas Operaciones Unitarias durante horas descubrí que eras la persona con la que siempre soñé compartir la vida. Gracias cielo, por acompañarme y apoyarme siempre durante este camino en el que resignificaste mi significado del amor y te convertiste en mi hogar, mi refugio y mi lugar seguro, te amo. Terminando con los agradecimientos a mi familia, quiero agradecer a mis mascotas y miembros chiquitos de la misma: Ron, Firu, Blacky, Gustavito y Francia, porque son una parte inmensa de mi corazón y la mitad de mi vida. Finalmente quiero dirigirme con mucho amor a mis amigas Adri, Jupi y a la Rumba \*\* Llanera: Sam, Dani, Mona, Juanca, Majo, Lu, Yire y Dana. Gracias amigas por llenar mi vida de risas, por sostenerme en los momentos difíciles y por ser ese lugar al que siempre sé que puedo volver. También gracias a Sebas, mi compañero de tesis y de carrera por su infinita paciencia, por ser siempre una compañía*

*incondicional y por hacer que este recorrido fuera mucho mas parchado. Sebas, gracias por recorrer este camino conmigo y apoyarme siempre.*

*Finalmente quiero agradecer a Kevin porque me enseñaste que hacer amigos nunca fue tan difícil como yo creía. Gracias por ayudarme en las prácticas de laboratorio. Sé que descansas en paz.*

*Con amor a todos,*

*Paula Mendoza*

### **Agradecimientos**

A la Universidad Industrial de Santander (UIS), por haber sido nuestro segundo hogar y el escenario de nuestro crecimiento académico y profesional.

Un agradecimiento muy especial al Gobierno Nacional, ya que a través del Programa de Gratuidad de la cohorte 2022-2026, hizo posible el financiamiento de nuestra matrícula y alivió el camino para convertirnos en profesionales.

A nivel personal (Sebastián), expreso mi profunda gratitud al Servicio de Alimentación de la Universidad. El beneficio del cupo completo de desayuno, almuerzo y cena no solo fue un soporte vital en el día a día de mis jornadas académicas, sino también una escuela de responsabilidad y retribución social durante las horas compartidas en mi rol como Auxiliar del servicio.

A nuestros Directores de Proyecto de Grado, por su valiosa guía, rigurosidad técnica y por cada una de las correcciones y comentarios compartidos, pues han sido fundamentales para elevar la calidad de este trabajo.

Al Centro de Investigación en Catálisis (CICAT), por abrirnos sus puertas, confiar en nuestras capacidades y permitirnos desarrollar este proyecto de grado en sus instalaciones.

Al Ingeniero Rodrigo Valderrama, por haber sido un eje técnico fundamental y un pilar invaluable en la construcción del SOP de la unidad Catatest II. Su disposición para guiarnos en el laboratorio, facilitarnos los registros históricos y compartir su valiosa experiencia con los documentos clave fue indispensable para el éxito de este trabajo.

## Tabla de Contenido

|                                                                                                        | <b>Pág.</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>INTRODUCCIÓN .....</b>                                                                              | <b>14</b>   |
| <b>1. OBJETIVOS .....</b>                                                                              | <b>17</b>   |
| 1.1 Objetivo General .....                                                                             | 17          |
| 1.2 Objetivos Específicos .....                                                                        | 17          |
| <b>2. ESTADO DEL ARTE.....</b>                                                                         | <b>18</b>   |
| 2.1 Fundamentos Químicos de la Hidrodesulfuración (HDS) .....                                          | 18          |
| 2.2 Metodologías de Análisis de Riesgos.....                                                           | 21          |
| 2.3 Procedimiento Operativo Estándar (SOP) como Barrera de Mitigación .....                            | 24          |
| <b>3. METODOLOGÍA.....</b>                                                                             | <b>26</b>   |
| 3.1 Etapa 1: Diagnóstico del estado operativo de la unidad Catatest II .....                           | 27          |
| 3.2 Etapa 2: Análisis de riesgos del proceso de hidrotratamiento mediante la metodología What If. .... | 29          |
| 3.3 Etapa 3: Formulación de estrategias de mitigación de riesgos.....                                  | 32          |
| <b>4. RESULTADOS .....</b>                                                                             | <b>33</b>   |
| 4.1 Levantamiento técnico y elaboración del diagrama P&ID de la unidad Catatest II                     | 33          |
| 4.2 Desarrollo del Manual de Procedimientos Operativos Estándar (SOP).....                             | 39          |
| 4.3 Identificación y Análisis de Riesgos a través de la metodología <i>What-If</i> .....               | 43          |
| 4.4 Análisis de la Estrategia de Mitigación .....                                                      | 48          |
| 4.4.1 Fortalecimiento de la seguridad inherente y los controles de ingeniería .....                    | 49          |

|                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.4.2 Robustecimiento de los controles procedimentales..... | 50        |
| <b>5. CONCLUSIONES .....</b>                                | <b>51</b> |
| <b>6. RECOMENDACIONES .....</b>                             | <b>53</b> |
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                      | <b>54</b> |

**Lista de Tablas**

|                                                                                                 | <b>Pág.</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Tabla 1</b> Inventario de equipos principales de la unidad Catatest II. ....                 | 36          |
| <b>Tabla 2</b> Estructura del SOP: etapas, planes y propósito. ....                             | 41          |
| <b>Tabla 3</b> Resumen de los escenarios evaluados en el análisis What-If. ....                 | 44          |
| <b>Tabla 4</b> Matriz <i>What If</i> de los escenarios evaluados en la unidad Catatest II.....  | 45          |
| <b>Tabla 5</b> Estrategias de mitigación propuestas, organizadas por jerarquía de control. .... | 49          |

### Lista de Figuras

|                                                                                                                                       |                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Figura 1</b> Diagrama de flujo metodológico para el uso de la matriz de valoración de riesgos en la unidad Catatest II. ....       | 31                                   |
| <b>Figura 2</b> Versión definitiva del Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID) de la unidad experimental Catatest II. ....      | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| <b>Figura 3</b> Estructura del Manual de Procedimientos Operativos Estándar (SOP) por etapas y planes. ....                           | 40                                   |
| <b>Figura 4</b> Estructura metodológica y componentes de diseño de las hojas de control del Manual SOP de la unidad Catatest II. .... | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| <b>Figura 5</b> Escenarios evaluados según la categoría de peligro identificada. ....                                                 | 46                                   |
| <b>Figura 6</b> Distribución de los escenarios por nivel de riesgo (actual y residual). ....                                          | 47                                   |

### **Lista de Apéndices**

#### **Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional**

**Apéndice A** Evidencia de trabajo en campo con el Estudiante de Doctorado Rodrigo Valderrama.

**Apéndice B** Registro fotográfico de validación en campo con los docentes directores del proyecto.

**Apéndice C** Conformación del equipo multidisciplinario el día que se llevó a cabo la primera sesión de aplicación de la metodología *What If*.

**Apéndice D** Matriz de valoración cualitativa de riesgos adaptada para la unidad Catatest II.

**Apéndice E** Hojas de datos de proceso individuales para componentes con documentación técnica de fabricante.

**Apéndice F** Inventario de instrumentación y elementos de control de la unidad Catatest II.

**Apéndice G** Versión definitiva del Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID) de la unidad experimental Catatest II en alta resolución.

**Apéndice H** Registro del material físico de señalización y etiquetado (*tags*) para los instrumentos y equipos de la unidad Catatest II.

**Apéndice I** Manual de Procedimientos Operativos Estándar (SOP) de la unidad Catatest II.

### Glosario

**Análisis de riesgos:** proceso sistemático para identificar peligros, estimar su probabilidad de ocurrencia y evaluar la gravedad de sus impactos potenciales.

**Consecuencia:** impacto de un evento incidental expresado en términos de lesiones humanas, daño ambiental, pérdidas materiales o afectación a la continuidad de la operación.

**Hidrotratamiento:** proceso de refinación que usa hidrógeno y catalizadores para remover heteroátomos presentes en las fracciones del petróleo, especialmente azufre, y nitrógeno, mejorando la calidad y estabilidad de los combustibles.

**Interlock:** sistema de control instrumentado diseñado para actuar de forma automática, interrumpiendo el flujo de la energía o fluidos de proceso cuando se detecta una desviación crítica en las variables operacionales (como sobrepresión o temperatura extrema).

**Micro-inventario:** cantidad total de masa de una sustancia peligrosa contenida dentro de los equipos y líneas de un proceso en un momento dado, caracterizada por darse a escala piloto o de banco (medida en mililitros o gramos), lo cual limita físicamente la magnitud de las consecuencias ante una liberación de materia o energía.

**P&ID:** diagrama de Tuberías e Instrumentación. Representación gráfica que detalla los equipos físicos, tuberías, flujos, instrumentación y lazos de control de una unidad de proceso.

**Riesgo Actual:** nivel de riesgo evaluado en las condiciones presentes de la planta, considerando únicamente las salvaguardas que ya se encuentran instaladas y activas.

**Riesgo Residual:** nivel de riesgo que permanece una vez que se han proyectado o implementado nuevas medidas de mitigación y salvaguardas adicionales.

**Salvaguarda:** dispositivo, barrera física o control administrativo diseñado para interrumpir la secuencia de un fallo, evitando el accidente o mitigando sus efectos.

**SOP (Standard Operating Procedure):** Procedimiento Operativo Estándar. Documento instructivo que detalla paso a paso cómo ejecutar una actividad operativa de forma segura, eficiente y estandarizada.

**What-If?:** metodología cualitativa de análisis de riesgos basada en formular preguntas estructuradas para identificar desviaciones en el proceso, evaluar sus efectos y verificar las salvaguardas

### Resumen

**Título:** Diagnóstico y análisis de riesgos como estrategia para la mitigación de fallas en la seguridad del proceso de hidrotratamiento en la unidad Catatest II del CICAT – UIS\*.

**Autores:** Paula Andrea Mendoza Delgado, Sebastián Ruiz Mahecha\*\*.

**Palabras Clave:** Seguridad de procesos, hidrotratamiento, análisis de riesgos, P&ID, procedimientos operativos, metodología *What If*.

**Descripción:** Esta investigación surge ante la necesidad de fortalecer la seguridad operativa en la unidad piloto de hidrotratamiento Catatest II del CICAT; un sistema de reacción que maneja sustancias altamente peligrosas, específicamente hidrógeno (gas altamente inflamable) y sulfuro de hidrógeno (gas altamente tóxico y corrosivo) bajo condiciones extremas de operación con presiones de hasta 50 bar y temperaturas de hasta 550 °C. El objetivo fue diagnosticar el estado actual de la planta de hidrotratamiento para proponer estrategias de mitigación de fallas en la seguridad del proceso que garanticen una operación segura y reproducible. La ruta metodológica para el diagnóstico de la planta se fundamentó en la construcción desde cero del diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) y la estandarización de Procedimientos Operativos (SOP); herramientas que constituyeron la base técnica para ejecutar un análisis de riesgos mediante la metodología *What-If* con un equipo multidisciplinario. A partir de la metodología *What-If*, de carácter cualitativo, se utilizó una matriz de valoración para categorizar la probabilidad y las consecuencias de las fallas sobre las personas, la economía, el medio ambiente y la comunidad académica. La evaluación permitió identificar y priorizar nueve escenarios de desviación operacional, y determinó que la pérdida de contención de gases (con acumulación de H<sub>2</sub>S por saturación de la solución neutralizante) y la sobrepresión del sistema son las amenazas de mayor nivel de riesgo. A partir de estos resultados se propusieron estrategias de mitigación organizadas por jerarquía de control, entre ellas la instalación de sistemas de detección de atmósferas peligrosas, válvulas de alivio calibradas y la optimización de los respaldos eléctricos (UPS). Es importante precisar que estas estrategias corresponden a recomendaciones derivadas del análisis y no a intervenciones ya ejecutadas en la planta; lo efectivamente materializado fue la documentación técnica (P&ID y SOP) y la identificación y priorización de los riesgos, que constituyen una base para futuros proyectos y un punto de referencia, desde la perspectiva de la seguridad de procesos, para las mejoras de la unidad Catatest II .

\*Trabajo de Grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Edgar Mauricio Morales Valencia. Codirectora Diana Paola Duarte Duarte

### Abstract

**Title:** Diagnosis and Risk Analysis as a Strategy for Mitigating Failures in Process Safety of the Hydrotreatment Unit Catatest II at CICAT – UIS\*.

**Authors:** Paula Andrea Mendoza Delgado, Sebastián Ruiz Mahecha\*\*.

**Key Words:** Process safety, hydrotreatment, risk analysis, P&ID, operating procedures, What If methodology.

**Description:** This investigation arises from the need to strengthen operational safety in the Catatest II hydrotreating pilot unit at the CICAT research group, a reaction system that handles highly hazardous substances, specifically hydrogen (a highly flammable gas) and hydrogen sulfide (a highly toxic and corrosive gas) under extreme operating conditions, with pressures up to 50 bar and temperatures up to 550 °C. The objective was to diagnose the current state of the pilot plant to propose process safety strategies for failure mitigation, ensuring a safe and reproducible operation. The methodological route for the plant's diagnosis was based on the construction from scratch of the Piping and Instrumentation Diagram (P&ID) and the standardization of Standard Operating Procedures (SOPs), tools that constituted the technical foundation to execute a risk analysis through the What-If methodology with a multidisciplinary team. Based on the What-If methodology, which is qualitative in nature, a risk assessment matrix was used to categorize the probability and consequences of failures affecting people, the economy, the environment, and the academic community. The assessment made it possible to identify and prioritize nine operational deviation scenarios, and it determined that the loss of gas containment (with H<sub>2</sub>S accumulation due to saturation of the neutralizing solution) and system overpressure are the highest-risk threats. Based on these results, mitigation strategies were proposed following the hierarchy of controls, including the installation of hazardous atmosphere detection systems, calibrated relief valves, and the optimization of the uninterruptible power supplies (UPS). It should be noted that these strategies are recommendations derived from the analysis and were not implemented in the plant; what was actually accomplished was the technical documentation (P&ID and SOP) and the identification and prioritization of the risks, which provide a basis for future projects and a process-safety reference for improvements to the Catatest II unit.

\*Bachelor Thesis.

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Edgar Mauricio Morales Valencia. Codirectora Diana Paola Duarte Duarte.

### Introducción

El hidrotratamiento es una operación fundamental en la refinación de petróleo, orientada a remover impurezas, especialmente compuestos de azufre, mediante la reacción de corrientes de hidrocarburos con hidrógeno en presencia de catalizadores bajo condiciones de alta temperatura y presión moderada. En este contexto, la literatura técnica reporta rangos operativos que típicamente oscilan entre 270 °C y 340 °C para la temperatura, y entre 6.9 bar y 207.0 bar para la presión (Gary et al., 2007). Esta tecnología es esencial para garantizar la calidad de los combustibles y cumplir especificaciones ambientales cada vez más estrictas (Dávila & Naranjo, 2023). A nivel internacional y nacional, normativas como los programas Tier de la EPA y la Ley 1972 de 2019 en Colombia han reducido progresivamente los límites de compuestos azufrados tolerados en el diésel y la gasolina hacia rangos de 10-15 ppm. En este sentido, las unidades de hidrotratamiento constituyen una estrategia tecnológica clave para disminuir el contenido de estos compuestos en los combustibles y asegurar el cumplimiento de dichos estándares regulatorios.

No obstante, el hidrotratamiento de hidrocarburos implica riesgos asociados al uso de hidrógeno y a la generación de gases peligrosos como el sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), un compuesto de alta toxicidad capaz de ocasionar fatalidades ocupacionales fulminantes por inhalación aguda (Christia-Lotter et al., 2007). El *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH) establece un valor IDLH (Inmediatamente Peligroso para la Vida o la Salud, por sus siglas en inglés) de 100 ppm para  $H_2S$  debido a su alta toxicidad por inhalación y advierte que la fatiga olfativa impide que el olfato sea un mecanismo confiable para su detección (NIOSH, 2019). Por ello, una liberación de  $H_2S$ , especialmente en espacios confinados o con ventilación limitada, constituye un escenario crítico capaz de causar la muerte del personal por asfixia química, además

de provocar corrosión severa y deterioro acelerado en la infraestructura metálica del entorno operativo.

En este contexto, la unidad piloto de hidrotratamiento Catatest II del Centro de Investigación en Catálisis (CICAT) de la Universidad Industrial de Santander constituye un entorno académico que reproduce, a escala piloto, las condiciones del proceso de hidrotratamiento. Aunque estas unidades manejan inventarios de proceso considerablemente menores que los de las plantas industriales, reproducen condiciones de operación similares, tales como el manejo de hidrógeno, temperaturas elevadas, sistemas presurizados y la presencia de compuestos potencialmente peligrosos. Por ello, las desviaciones operativas que puedan presentarse durante su funcionamiento también pueden generar riesgos para el personal, los equipos y el desarrollo de las actividades académicas e investigativas. En consecuencia, estas instalaciones requieren herramientas que permitan diagnosticar su estado operativo, identificar escenarios de riesgo y establecer medidas de control acordes a su condición de unidades piloto de tipo universitario, dónde la disponibilidad de recursos e instrumentación automática suele ser más limitada que en instalaciones industriales.

En ese orden, identificamos que, a pesar del alto nivel de riesgo de estas operaciones, la unidad Catatest II carecía de un soporte documental técnico y actualizado, evidenciado en la ausencia de diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID) fidedignos y de procedimientos operativos estandarizados (SOP). Esta carencia limitaba la capacidad de gestionar preventivamente las fallas operativas, ejecutar análisis de riesgos sistemáticos y consolidar una cultura de seguridad robusta alineada con los estándares de la investigación actual.

Por lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar la seguridad operacional de la unidad Catatest II mediante el diagnóstico de su estado operativo, la identificación y análisis de los riesgos asociados, y la formulación de estrategias de mitigación orientadas a fortalecer la seguridad del proceso y reducir la probabilidad de ocurrencia de eventos que puedan afectar al personal, las instalaciones y la adecuada ejecución de las actividades académicas y de investigación.

Para desarrollar este propósito, el documento se organiza en cinco capítulos: el Capítulo 1 delimita el alcance técnico mediante los objetivos; el Capítulo 2 compila el estado del arte y los antecedentes relacionados con el hidrotratamiento y la seguridad de procesos; el Capítulo 3 describe la metodología empleada para la elaboración del P&ID, el diagnóstico operativo y el análisis de riesgos mediante la metodología *What If*; el Capítulo 4 presenta y analiza los resultados obtenidos, incluyendo el P&ID propuesto, los escenarios de riesgo identificados, la evaluación del riesgo y las estrategias de mitigación propuestas; el Capítulo 5 expone las conclusiones y, finalmente, el Capítulo 6 lista las recomendaciones derivadas del estudio.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Estudiar la seguridad del proceso de hidrotratamiento en la unidad Catatest II del CICAT-UIS, mediante el diagnóstico operativo y el análisis de riesgos, para proponer estrategias de mitigación y fortalecimiento de la operación segura.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- 1.2.1 Diagnosticar el estado operativo de la unidad de hidrotratamiento Catatest II del CICAT – UIS, mediante la recopilación, revisión y análisis de la información documental y de campo relacionada con sus condiciones actuales de operación.
- 1.2.2 Analizar los riesgos presentes en el proceso de hidrotratamiento en la unidad Catatest II del CICAT - UIS mediante la identificación y valoración de las condiciones operativas que puedan comprometer la seguridad del proceso.
- 1.2.3 Proponer estrategias de mitigación de riesgos y fortalecimiento de la cultura de seguridad en la operación de la unidad Catatest II, incorporando medidas de control técnico, procedimental y formativo acordes con las mejores prácticas de seguridad de procesos.

## 2. Estado del Arte

El marco conceptual y referencial de este trabajo de grado compila los antecedentes científicos, normativos y metodológicos que sustentan la investigación en la unidad Catatest II – UIS. Para abordar la problemática de forma integral, este capítulo se divide en cuatro ejes temáticos fundamentales: en primera instancia, se examinan las tendencias globales y nacionales en la hidrodeshulfurización de combustibles y sus exigencias regulatorias; en segundo lugar, se evalúan los fundamentos de la seguridad de procesos aplicados rigurosamente a la escala de laboratorios y plantas piloto universitarias; posteriormente, se describen las ventajas analíticas de las metodologías cualitativas para la identificación predictiva de peligros; y, finalmente, se fundamenta el rol de la estandarización procedimental en la mitigación del error operativo.

### 2.1 Fundamentos Químicos de la Hidrodeshulfuración (HDS)

El proceso de hidrotreatment, que es denominado hidrodeshulfuración (HDS) cuando se enfoca en la remoción de azufre, consiste en la estabilización de corrientes de hidrocarburos mediante su reacción exotérmica con hidrógeno sobre catalizadores de óxidos metálicos, un mecanismo que a nivel molecular rompe los enlaces carbono-azufre y satura las moléculas resultantes.

La complejidad de la HDS radica en la diversidad de las especies azufradas presentes en el petróleo, clasificadas principalmente en mercaptanos ( $\text{RSH}$ ), sulfuros ( $\text{R}_2\text{S}$ ), disulfuros ( $(\text{RS})_2$ ) y tiofenos ( $\text{C}_4\text{H}_4\text{S}$ ). De acuerdo con Gary et al. (2007), la dificultad de remoción aumenta según la estructura molecular, siendo las cadenas parafínicas las más fáciles de tratar, mientras que los compuestos aromáticos y cíclicos presentan la mayor refractariedad. Independientemente de la estructura inicial, el azufre extraído deriva obligatoriamente en la formación de sulfuro de

hidrógeno ( $H_2S$ ), gas cuya severa peligrosidad ya ha sido advertida con anterioridad, siendo este el principal subproducto gaseoso del proceso de hidrodeshulfurización (HDS).

En ese orden, para cumplir con los procesos de seguridad en unidades de escala piloto, resulta necesario garantizar la conversión de los compuestos más resistentes y cumplir con los estándares actuales de diésel de ultra-bajo azufre (ULSD). Por ello, las condiciones operativas en la unidad Catatest II alcanzan temperaturas de reacción de hasta 400 °C durante los regímenes de máxima exigencia térmica, como lo es la etapa de activación del catalizador, valores que superan los límites de los rangos operativos de referencia reportados en la literatura técnica para procesos de hidrotratamiento, los cuales oscilan típicamente entre los 270 °C y 340 °C (Gary et al., 2007).

A diferencia de las refinerías industriales, las unidades de investigación como Catatest II, presentan desafíos únicos por la constante intervención manual y la proximidad del investigador con el proceso. Bajo esta premisa, Lowry & Wagner (2016, p. 22), en su reporte para el PNNL, señalan al  $H_2$  como el riesgo crítico predominante; un escenario de alto impacto es el uso inadvertido de  $H_2$  en lugar de  $N_2$  para pruebas de hermeticidad (*leak checks*), lo que genera rápidamente atmósferas inflamables si el monitoreo no es riguroso.

Esta vulnerabilidad se intensifica al fallar las salvaguardas; al respecto, Ness (2015, p. 23.), para el *Center for Chemical Process Safety* (CCPS), explica mediante el modelo de queso suizo que los incidentes ocurren cuando se alinean debilidades como errores humanos, malfuncionamientos de equipos de un solo punto o inadecuaciones en los análisis de peligros. De este modo, es primordial contar con un análisis especializado que entrelace el control de las variables del proceso con una vigilancia constante para evitar que estas fallas latentes se alineen y propaguen el riesgo.

Bajo esta perspectiva, Aziz et al. (2012) argumentan que la gestión de la seguridad de procesos en plantas piloto a escala de laboratorio representa un componente crítico en la ingeniería química, donde frecuentemente se subestiman los riesgos debido al manejo de los inventarios reducidos. En ese sentido, los autores advierten que “*las operaciones novedosas, la alta densidad de equipos y las tecnologías cambiantes o no probadas generan un impacto de peligro significativo*” (Aziz, et al. 2012, p. 84). Esta vulnerabilidad organizacional en entornos académicos es corroborada a nivel global; un análisis sistémico publicado por Bai, et al. en el Journal of Loss Prevention in the Process Industries (2022, p. 3) evidenció que los factores humanos y las deficiencias en el entrenamiento técnico constituyen las causas raíz más recurrentes en un histórico de 110 accidentes universitarios.

Cuando estas debilidades operativas coinciden con micro-inventarios críticos, el riesgo se materializa de forma catastrófica. Como evidencia de ello, el reporte de la University of California Center for Laboratory Safety (2016, p. 4) detalló la explosión en la Universidad de Hawái en Manoa, donde una mezcla presurizada de hidrógeno y oxígeno detonó debido a una transferencia de electricidad estática en un tanque sin conexión a tierra, provocando severos daños estructurales y lesiones irreversibles. Ante este panorama, Bullemer y Hajdukiewicz (2004, p. 2) subrayan que entre el 40% y el 70% de los accidentes en plantas de procesos derivan de fallas operativas o procedimentales, lo que exige mitigar el riesgo mediante una “clasificación de procedimientos basada en el riesgo” para normar rigurosamente las tareas operativas críticas. De este modo, la seguridad en unidades piloto demanda metodologías robustas que controlen rigurosamente las interacciones físicas y operacionales del sistema.

## 2.2 Metodologías de Análisis de Riesgos

En el ámbito de la ingeniería de procesos, la seguridad de procesos surge como respuesta a accidentes mayores en la industria química y petroquímica, y su fortalecimiento depende en buena medida de aprender de incidentes previos para reducir la probabilidad de que se repitan (2015 p. 23). En tal contexto, las metodologías de análisis de riesgos se conciben como herramientas estructuradas y sistemáticas diseñadas para identificar peligros, evaluar los escenarios de falla potenciales y definir salvaguardas que eviten dichas pérdidas. Técnicamente, estas metodologías se clasifican en métodos cualitativos y cuantitativos (Chavando & Cruz, 2024, p. 30). No obstante, Lyon y Popov (2020, p. 42.) explican en su artículo "*The Power of What If. Assessing & Understanding Risk*" que la aplicación de metodologías industriales rígidas y tradicionales, como el estudio de peligro y operabilidad conocido como HAZOP, puede presentar severas limitaciones operativas si el sistema analizado opera bajo configuraciones dinámicas o experimentales que requieren flexibilidad analítica.

Ante este panorama, el análisis *What If* se consolida como una alternativa cualitativa idónea basada en un enfoque de equipo. Como detallan Lyon y Popov (2020, p. 36), esta metodología fue desarrollada originalmente por la industria química británica en la década de 1960 precisamente como una alternativa más fácil y accesible frente a la rigidez del método HAZOP. Los autores definen conceptualmente este método como una "curiosidad razonada con el propósito de descubrir para reducir la incertidumbre" antes de que ocurra un incidente. La justificación técnica para el uso de esta herramienta radica en que el proceso exige de forma obligatoria que el equipo de análisis reúna, estudie y observe minuciosamente la documentación de referencia técnica del sistema, requiriendo explícitamente los diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID), esquemas, dibujos, manuales de instrucciones y especificaciones de los componentes.

A nivel operativo, el proceso detallado en *The Power of What If* (2020) consiste en el uso de un equipo multidisciplinario y transversal que discute los aspectos del sistema de una manera aleatoria y creativa, utilizando la tormenta de ideas (*brainstorming*) para desglosar una serie de acciones o pasos con el fin de comprender los peligros relacionados con el proceso, sus causas y sus efectos. Entre sus ventajas principales, los autores destacan que es un método fácil de usar, pues permite que individuos con poca experiencia en evaluación de riesgos participen de manera significativa y obtengan una comprensión más profunda del proceso industrial.

Sin embargo, Lyon y Popov (2020, p. 42) enfatizan limitaciones críticas y deficiencias del análisis *What If* tradicional que restringen su alcance si se aplica de forma aislada. En primer lugar, los autores aclaran que el método tradicional es estrictamente un análisis de peligros y no una evaluación de riesgos, debido a que no estima niveles de riesgo y, por consiguiente, no distingue cuáles de los peligros identificados presentan la mayor amenaza real para la operación.

En segundo lugar, la efectividad técnica del método posee una dependencia absoluta de la calidad de las preguntas planteadas, siendo útil únicamente si se formulan las interrogantes correctas. En tercer lugar, el método depende fuertemente de la intuición y la experiencia previa de los miembros del equipo, lo que lo convierte en una herramienta inherentemente subjetiva y con un elevado potencial de generar sesgos en el análisis.

Finalmente, los autores señalan como una desventaja importante que los resultados cualitativos de un análisis *What If* tradicional pueden ser más difíciles de traducir en argumentos técnicos convincentes que motiven o justifiquen un cambio ante los tomadores de decisiones de la organización.

Como antecedente práctico de la aplicación de este análisis cualitativo de peligros en procesos de escala de investigación institucional, Lowry y Wagner (2016, p. 10) desarrollaron una

evaluación bajo la metodología análisis *What If* enfocada en las operaciones de hidrotratamiento y destilación en la instalación experimental PDL-West del PNNL.

En su reporte técnico, los autores demostraron que ante sistemas de investigación donde las configuraciones de los equipos varían entre experimentos, el análisis *What If* ofrece la flexibilidad necesaria para mapear de manera rigurosa peligros como sobrepresiones, fugas de corrientes inflamables e inhalación de vapores tóxicos, facilitando el diseño de barreras físicas y controles de ingeniería en los recipientes.

No obstante, la identificación de peligros a través del análisis *What If* es insuficiente si la planta se limita a analizar la confiabilidad física o mecánica de sus componentes de manera aislada, obviando los factores humanos. Bullemer (2019) expone que los accidentes mayores en la industria rara vez ocurren por fallos puramente mecánicos del hardware, sino que suelen estar condicionados por restricciones organizacionales y fallas latentes en los sistemas de gestión. Por lo tanto, la mitigación efectiva de los escenarios de peligro identificados en el análisis *What If* depende de la correcta formulación de barreras administrativas indispensables que estandaricen las tareas del personal, mitiguen las limitaciones de la supervisión y controlen los factores humanos en el laboratorio; un principio estrechamente ligado al concepto de disciplina de seguridad del CCPS, el cual promueve el cumplimiento riguroso, consistente y consciente de las prácticas seguras. Esta necesidad de transformar un listado pasivo de peligros en una estrategia viva de mitigación mediante el control operativo del personal técnico fundamenta directamente el desarrollo e implementación de los Procedimientos Operativos Estandarizados (SOP), planteados como la herramienta normativa para estandarizar las acciones de los operadores ante las desviaciones del proceso.

### 2.3 Procedimiento Operativo Estándar (SOP) como Barrera de Mitigación

Como consecuencia directa de la identificación y evaluación de análisis de riesgos abordadas previamente, se hace indispensable establecer salvaguardas que actúen de forma preventiva sobre la operación diaria del sistema. En este contexto, los Procedimientos Operativos Estándar (SOP) no deben considerarse meros documentos administrativos estáticos, sino salvaguardas operacionales de naturaleza dinámica y esenciales para el control de desviaciones operacionales. La correcta estructuración e implementación de un SOP actúa directamente sobre el factor humano, el cual representa una de las variables con mayor incertidumbre dentro de cualquier sistema de procesamiento químico. De acuerdo con Bullemer y Hajdukiewicz (2004), las prácticas procedimentales efectivas y bien diseñadas reducen de manera drástica la carga cognitiva y el estrés operativo del personal técnico. Al estandarizar las secuencias críticas de operaciones complejas, tales como el encendido, la estabilización de variables y el apagado controlado, se minimiza la probabilidad de errores por omisión o fallas de juicio, evitando que las acciones humanas se conviertan en eventos desencadenantes de incidentes en el proceso.

No obstante, la existencia documental de un SOP es ineficaz si no se encuentra respaldada por una cultura institucional fundamentada en la disciplina de seguridad. Atendiendo las directrices conceptuales del CCPS, presentadas por AIChE en *Introduction to process safety for undergraduates and engineers* (2016), la disciplina de seguridad de proceso se define como el compromiso riguroso, ético y operacional de ejecutar cada tarea de forma estricta, consistente y conforme a los estándares técnicos establecidos. Esto implica que la disciplina de seguridad transforma el documento escrito en una acción defensiva continua, asegurando que los operadores sigan rigurosamente las secuencias procedimentales sin recurrir a improvisaciones o “atajos” que alteren los márgenes de seguridad preestablecidos del equipo de trabajo. La falta de consistencia

o el relajamiento en esta disciplina anula la capacidad protectora del procedimiento, dejando la integridad del proceso expuesta a la ocurrencia inminente de un incidente catastrófico.

La necesidad de asociar de manera estrecha los SOP robustos con una disciplina operativa estricta se acentúa notablemente al retomar el escenario de vulnerabilidad académica expuesto anteriormente. El ya mencionado incidente reportado por la University of California Center for Laboratory Safety. (2016) en la Universidad de Hawái en Manoa constituye la evidencia empírica más contundente de lo que ocurre cuando coexisten deficiencias estructurales en los SOP con fallas severas en la disciplina operativa. Este caso demuestra que, ante operaciones que involucran sustancias de alta peligrosidad bajo condiciones extremas de presión, la ausencia de una guía procedimental detallada o el incumplimiento riguroso de la misma anula cualquier otra salvaguarda física del sistema. Por consiguiente, la formalización técnica del SOP en sistemas piloto como la unidad Catatest II se erige como un requisito indispensable para garantizar que el conocimiento operativo trascienda la experiencia individual, mitigando de forma activa los riesgos inherentes al manejo de gases inflamables mediante un estándar de seguridad colectiva.

El cierre del ciclo de gestión de riesgos no concluye con la identificación de peligros, sino con la implementación de barreras de mitigación que guíen la acción humana. En este ámbito, el CCPS (2023) sostiene que la efectividad de un análisis de riesgos cualitativo depende de su capacidad para traducirse en instrucciones claras y ejecutables. Por ello, la creación de Procedimientos Operativos Estándar (SOP, por sus siglas en inglés) se erige como la estrategia de la mitigación más robusta para prevenir el error operativo en sistemas complejos.

### 3. Metodología

El desarrollo metodológico de este trabajo de grado se estructuró bajo un enfoque descriptivo-analítico, orientado a evaluar y fortalecer la seguridad operativa de la unidad piloto de hidrotratamiento Catatest II. Para garantizar un diagnóstico sistemático y la validez técnica de las barreras de mitigación propuestas, la investigación se articuló de forma secuencial en tres etapas macro fundamentales: en primer lugar, se realizó el levantamiento de la línea base técnica de la planta mediante la recopilación y consolidación de información documental y de campo, que comprendió el inventario de equipos y accesorios de la unidad, la construcción del diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) y la elaboración de fichas técnicas de los equipos para los cuales se dispuso de información, con el fin de establecer un soporte técnico confiable y auditable del sistema. En segundo lugar, la identificación y priorización cualitativa de escenarios de falla, mediante un análisis de riesgos, utilizando la metodología *What-If* acoplada a una matriz de valoración de riesgos; y, finalmente, la formulación de barreras operativas basadas en procedimientos, orientadas a institucionalizar la disciplina operativa y mitigar el riesgo residual en el laboratorio.

Esta planificación estructurada constituye la hoja de ruta que guio la ejecución secuencial del proyecto, asegurando que cada etapa proporcionara los insumos técnicos indispensables para el desarrollo de la siguiente. De este modo, el diagnóstico operativo inicial sentó las bases para un análisis cualitativo preciso, construido a partir de la discusión multidisciplinaria generada durante el análisis de riesgos, cuyos hallazgos finalmente decantaron en las acciones preventivas consignadas en el manual final. A este resultado se suma un conjunto de recomendaciones técnicas surgidas del consenso del equipo de trabajo, las cuales se enfocan en mejoras físicas de la infraestructura e instrumentación de la unidad.

### 3.1 Etapa 1: Diagnóstico del estado operativo de la unidad Catatest II

El análisis exhaustivo de la línea base operativa constituye la base fundamental del estudio, debido a que la validez de un análisis de riesgos cualitativo depende directamente de la fidelidad de la información técnica disponible. Por esta razón, el diagnóstico no se resolvió en una única inspección, sino que demandó un trabajo de campo iterativo desarrollado a lo largo de múltiples visitas a la planta piloto, las cuales permitieron confrontar progresivamente las especificaciones de diseño con el estado de degradación actual y las modificaciones previas del sistema experimental.

El acercamiento a la unidad inició con una visita de reconocimiento junto a los directores del trabajo de grado, orientada a la identificación general de la planta piloto y sus sistemas principales. A partir de este primer contacto, se llevaron a cabo tres acompañamientos operativos que cubrieron el ciclo completo de funcionamiento de la unidad, incluyendo el armado del reactor y la prueba de fugas, el cargado del reactor, la preparación de la carga líquida, el secado y la activación del catalizador, el acondicionamiento de las condiciones de operación, la reacción, la toma de muestras, la despresurización, el enfriamiento y limpieza del sistema de reacción, y finalmente el desmontaje, desarmado y lavado del sistema.

Cada una de estas sesiones tuvo una duración aproximada de 20 horas y se realizó junto al estudiante de doctorado Rodrigo Valderrama, quien desempeña el rol de operario de la planta piloto (parte del registro fotográfico de estas sesiones se encuentra en el **Apéndice A** al final de este documento). Su acompañamiento fue determinante para el estudio, ya que permitió observar de primera mano la interacción manual real entre el operario y la unidad, así como recibir la retroalimentación técnica y las pruebas de verificación necesarias para validar que la información levantada correspondiera fielmente a las condiciones y secuencias de operación reales del sistema

De manera paralela a los acompañamientos operativos, se realizaron múltiples visitas por parte de los estudiantes autores de este proyecto orientadas a la revisión visual de los equipos, la instrumentación y el levantamiento de la información requerida para la construcción del diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID). La consolidación de este diagrama justifica su relevancia técnica en el establecimiento de los límites físicos y las variables de control del proceso.

La elaboración del diagrama fue un proceso iterativo que involucró cuatro versiones sucesivas del P&ID; cada versión fue sometida a su correspondiente revisión de campo para verificar y corregir la configuración representada, así como a dos visitas de revisión conjunta con los profesores directores del trabajo de grado (tal y como se evidencia en el **Apéndice B**). La ejecución de esta etapa metodológica dio como resultado el Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID) definitivo de la unidad experimental.

Dado que este plano constituye uno de los hallazgos fundamentales del diagnóstico de campo, su análisis detallado, la descripción técnica de sus componentes y el esquema de flujo correspondiente se presentan e integran formalmente como la **Figura 2** en el **Capítulo 4 (Resultados)**, quedando el plano con una mejor resolución como soporte complementario en el **Apéndice G** al final del documento.

Como complemento al diagrama, se elaboraron las fichas técnicas de los equipos (de los que se dispuso información), con el fin de documentar sus características y parámetros de operación. Paralelamente, la estructuración de un borrador preliminar del Procedimiento Operativo Estándar (SOP) durante esta fase inicial respondió a una necesidad metodológica crítica: caracterizar detalladamente las secuencias de arranque, la operación continua y la parada planificada. Este documento borrador permitió plasmar la interacción manual real del operario con

la planta piloto, sirviendo como el principal insumo procedimental que sería optimizado en las fases posteriores de la investigación.

### **3.2 Etapa 2: Análisis de riesgos del proceso de hidrotratamiento mediante la metodología**

#### **What If.**

El análisis de riesgos se desarrolló sobre la información técnica consolidada en la Etapa 1, tomando como insumos principales el diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) en su versión final, el borrador preliminar del Procedimiento Operativo Estándar (SOP), las fichas técnicas de los equipos, los manuales de fabricante disponibles y las observaciones registradas durante la inspección en campo. Estos documentos permitieron establecer una comprensión detallada de la configuración física del sistema y de sus secuencias reales de operación, condición necesaria para aplicar la metodología.

El alcance del análisis abarcó el proceso de hidrotratamiento de la unidad Catatest II a lo largo de sus etapas operativas, desde la alimentación y presurización del sistema con hidrógeno y carga líquida, pasando por el acondicionamiento y la reacción, hasta la toma de muestras, la despresurización, el enfriamiento y la limpieza del sistema de reacción. El estudio se estructuró por segmentos asociados a estas secuencias operativas, empleando el borrador del SOP como hoja de ruta para recorrer sistemáticamente cada paso del procedimiento.

Para la ejecución del análisis se conformó un equipo multidisciplinario integrado por los directores del proyecto, los profesores Edgar Mauricio Morales Valencia y Diana Paola Duarte; los docentes Víctor Gabriel Baldovino Medrano y Edwing Alexander Velasco Rozo; el técnico de mantenimiento Pedro Enrique Caldas Barrera, de la División de Planta Física de la UIS; y los estudiantes autores de este trabajo de grado, Paula Andrea Mendoza Delgado y Sebastián Ruiz Mahecha. Esta composición permitió cruzar la experiencia en campo con el rigor analítico y

mitigar el sesgo individual en la identificación de escenarios (en el **Apéndice C** se encuentra material fotográfico del día de la reunión).

La aplicación de la metodología What-If se llevó a cabo en dos sesiones estructuradas de trabajo, realizadas el 25 de mayo y el 9 de junio de 2026. En cada sesión, el equipo formuló de manera sistemática preguntas hipotéticas del tipo "¿Qué pasaría si...?" sobre cada sección del proceso, con el fin de anticipar desviaciones operativas, fallas mecánicas, errores humanos y condiciones inseguras. Para cada escenario planteado se documentaron la desviación identificada, sus causas, las consecuencias potenciales del evento, las salvaguardas o medidas de seguridad existentes, las recomendaciones de mejora técnica o procedimental, el riesgo residual proyectado tras la intervención, las observaciones pertinentes y el responsable asignado a cada acción.

Con el objetivo de categorizar la magnitud de los escenarios identificados, se construyó y aplicó una matriz de valoración de riesgos adaptada a las dinámicas del laboratorio universitario, cuyo procedimiento sistemático de aplicación se ilustra en la **Figura 1**.

**Figura 1.**

*Diagrama de flujo metodológico para el uso de la matriz de valoración de riesgos en la unidad Catatest II.*



*Nota: autores, adaptado mediante herramientas de diseño de IA (2026)*

Esta herramienta cualitativa evalúa los impactos a través de cuatro dimensiones estratégicas: Personas, Económica (en pesos colombianos), Ambiental, y Comunidad Académica y/o Proyectos de Investigación. De este modo, tal como se desglosa en dicha guía, el nivel de gravedad final (en una escala del 0 al 5) se determina de manera conservadora por el impacto más severo alcanzado en cualquiera de las dimensiones mencionadas. Asimismo, la probabilidad se estima mediante cuatro niveles (A a la D), fundamentados en el historial de incidentes de la institución y en la experiencia técnica del equipo evaluador.

Para operativizar este análisis en la planta piloto durante el desarrollo del proyecto, se estructuró una herramienta de evaluación cualitativa, la cual se detalla de forma completa en el **Apéndice D** debido a su extensión metodológica. Esta clasificación permitió priorizar los escenarios de mayor nivel de riesgo y orientar la formulación de las acciones de mitigación desarrolladas en la Etapa 3.

### **3.3 Etapa 3: Formulación de estrategias de mitigación de riesgos**

A partir de los escenarios priorizados en la Etapa 2, se formularon las estrategias de mitigación siguiendo el principio de la jerarquía de control de riesgos, con el fin de orientar cada propuesta hacia el nivel de control más efectivo frente a la causa raíz del peligro identificado. Para cada escenario clasificado como crítico según la valoración de riesgo, se definieron las medidas de control correspondientes, evaluando su factibilidad dentro de las condiciones operativas y las limitaciones de automatización propias de una unidad experimental en el contexto universitario y asignando una persona responsable de llevarlas a cabo.

Las medidas formuladas se clasificaron según su horizonte de implementación en acciones de corto, mediano y largo plazo, de manera que se pudiera diferenciar entre las intervenciones aplicables de forma inmediata y aquellas que requerían mayores recursos o modificaciones sobre el sistema. Este ordenamiento se estableció con base en el nivel de riesgo de cada escenario y en la viabilidad técnica de las salvaguardas propuestas.

Posteriormente, se procedió a la optimización, actualización y consolidación del preliminar del Procedimiento Operativo Estándar (SOP) elaborado en la Etapa 1, incorporando las recomendaciones de mejora técnica y procedimental derivadas del análisis What-If. Para ello, se revisaron las secuencias operativas documentadas y se integraron los controles procedimentales definidos, con el propósito de que el SOP recogiera las barreras de seguridad resultantes del análisis de riesgos. El desarrollo de esta etapa se llevó a cabo durante un periodo aproximado de ocho semanas.

#### **4. Resultados**

En este capítulo se presentan y discuten los hallazgos derivados de la aplicación sistemática de la ruta metodológica diseñada para la unidad Catatest II. Los resultados se exponen de forma cronológica, reflejando la evolución del proyecto desde la consolidación de la información técnica base hasta la estructuración de las defensas operativas de la planta. Inicialmente, se presenta el levantamiento técnico de la unidad, que comprende la elaboración del P&ID, el inventario de equipos e instrumentación y los hallazgos sobre el estado físico de los componentes.

De manera paralela a la construcción del P&ID, se adelantó un borrador preliminar del Procedimiento Operativo Estándar (SOP) a partir de los acompañamientos realizados durante la operación de la planta a cargo del ingeniero Rodrigo Valderrama, quien explicaba el funcionamiento del sistema y la secuencia real de cada etapa del proceso.

Posteriormente, se exponen las matrices obtenidas durante las sesiones de análisis de riesgos con el equipo multidisciplinario, en las cuales dicho borrador del Procedimiento Operativo Estándar (SOP) sirvió como hoja de ruta para recorrer sistemáticamente las etapas del proceso. Finalmente, se presenta el SOP robustecido con las recomendaciones derivadas de dichas sesiones, junto con la jerarquización de las estrategias de mitigación formuladas para salvaguardar la integridad de la planta y del laboratorio.

##### **4.1 Levantamiento técnico y elaboración del diagrama P&ID de la unidad Catatest II**

Antes del levantamiento, la unidad Catatest II no contaba con documentación técnica integrada ni trazable de su configuración real; en particular, no existía un Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID) ni un Procedimiento Operativo Estándar (SOP) vigentes. La información disponible se reducía a los manuales de fabricante de algunos equipos comerciales, recuperables a partir de sus referencias, y a las placas de características físicas presentes en ciertos componentes.

Por esta razón, el diagrama no partió de ningún documento o esquema previo, sino que se construyó desde cero mediante el reconocimiento directo de la planta a lo largo de múltiples visitas de campo, apoyadas en una inspección visual y funcional de los sistemas principales y en la revisión de la documentación mencionada. Durante estas visitas se registraron las interconexiones reales entre equipos, el trazado de las líneas de proceso, los diámetros de tubería y la instrumentación asociada a cada lazo de control.

El proceso que se lleva a cabo en esta unidad inicia en la sección de alimentación, con el tanque de carga D-105 (1 L, presión atmosférica), desde donde la carga líquida es impulsada por la bomba P-101, de desplazamiento positivo tipo HPLC de doble pistón (0.000 a 12.00 mL/min; máx. 6000 psi / 413 bar).

La corriente presurizada ingresa a la sección de reacción, integrada por el horno H-101 (dos zonas, 2000 W a 220 V) y el reactor tubular R-101 ( $\varnothing$  interno  $\frac{1}{2}$ ", 610 mm), donde ocurre la hidrodesulfuración en presencia de hidrógeno a aproximadamente 350 a 400 °C.

Los efluentes pasan al separador flash de alta presión D-101 (500 cc, 1500 psig) y al intercambiador de serpentín HE-101 (agua a  $\sim 15$  °C), antes de recolectarse en el tanque de almacenamiento D-103 (750 mL).

El manejo de las corrientes gaseosas se realiza mediante los recipientes de neutralización D-102 y D-104, recipientes plásticos genéricos de carácter provisional (D-102,  $\sim 150$  mL) que no forman parte del equipamiento fijo de la unidad y, por ello, no se incluyen en la **Tabla 1**.

El suministro de gases proviene de una estación externa de cilindros con sus estaciones de regulación y válvulas de seguridad (hidrógeno de activación, hidrógeno de reacción y nitrógeno), además del cilindro local de H<sub>2</sub>S 99,5%, de la marca Linde.

El control del proceso se articula mediante lazos de temperatura, flujo y presión, apoyados en indicadores locales de presión (PI) y nivel (LG), filtros de línea de 0.5  $\mu\text{m}$  (F-101 a F-103) y elementos de protección como válvulas de retención (CK) y reguladores/alivio (PRV).

A partir de la inspección en campo y de la información recuperada, se consolidó el inventario de los equipos principales de la unidad. La **Tabla 1** resume cada equipo con su fabricante o referencia cuando esta era legible, su función y sus condiciones de diseño y de operación. La información se tomó de los manuales y fichas técnicas de fabricante para los equipos comerciales (P-101, D-101 y D-103) y, para los demás, mediante inspección visual directa de las placas de características visibles en el equipo en el mes de marzo de 2026; los datos no legibles se registran como «No identificable».

**Tabla 1**  
*Inventario de equipos principales de la unidad Catatest II.*

| TAG    | EQUIPO                   | TIPO / DESCRIPCIÓN                                                    | CAPACIDAD / DIMENSIONES                              | CONDICIONES MÁXIMAS DE OPERACIÓN                                                             | MATERIAL                                               | MARCA / MODELO                                             | FUENTE / REFERENCIA                                                                                                                                                                                                                                                                |
|--------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| P-101  | Bomba de alimentación    | Bomba dosificadora HPLC de doble pistón (control por microprocesador) | 0.000–12.00 mL/min<br>5.5 × 10.375 × 17.5 in · 30 lb | ≤ 6000 psi (cabezal SS con amortiguador de pulsos)<br>10–30 °C · 100–240 VAC, 50/60 Hz, 45 W | Acero inoxidable 316<br>Fluorocarbono (partes húmedas) | Scientific Systems Inc. (SSI), Model 1500 Dual Piston Pump | Scientific Systems, Inc. (s.f.). Model 1500 dual piston pump: Operator's manual (902492 Rev.P). Ruta: AVANCES_DIRECTORES > MANUALES > Manual (P 101) Model 1500 Operators Manual                                                                                                   |
| R-101  | Reactor                  | Reactor tubular                                                       | Øint ½" × 610 mm                                     | 1500 psi @ 550 °C                                                                            | Acero inoxidable 316                                   | No identificable                                           | Inspección visual (características grabadas en el equipo o accesorio), marzo de 2026                                                                                                                                                                                               |
| H-101  | Horno de calentamiento   | Horno de 2 zonas                                                      | 2000 W (2×1 kW) @ 220 V                              | T. diseño 800 °C (1073 K)<br>T. op. 350–400 °C                                               | No identificable                                       | No identificable                                           | Inspección visual (características grabadas en el equipo o accesorio), marzo de 2026                                                                                                                                                                                               |
| HE-101 | Intercambiador de calor  | Serpentín (4 vueltas)                                                 | 90 cm / 1/4" OD                                      | ~15 °C (agua de enfriamiento)                                                                | No identificable                                       | No identificable                                           | Inspección visual (características grabadas en el equipo o accesorio), marzo de 2026                                                                                                                                                                                               |
| D-101  | Separador flash          | Cilindro de muestreo DOT-3E (recipiente separador)                    | 500 cm³ · 1/4" NPT hembra ×2                         | Máx. catálogo: 124 bar (1800 psig), Tmáx 426 °C (800 °F)<br>Op. en planta: 1500 psig         | Acero inoxidable 316L                                  | Swagelok 316L-HDF4-500                                     | Swagelok Company. (s.f.). Cilindro de toma de muestras DOT 316L-HDF4-500 [Ficha técnica].<br><a href="https://products.swagelok.com/es/c/cilindros-de-conformidad-con-dot/p/316L-HDF4-500">https://products.swagelok.com/es/c/cilindros-de-conformidad-con-dot/p/316L-HDF4-500</a> |
| D-103  | Tanque de almacenamiento | Cilindro de muestreo DOT-3E                                           | 750 mL · 1/4" NPT                                    | 124 bar (1800 psig) @ –65 a 100 °F                                                           | Acero inoxidable 316                                   | Hoke DOT-3E 1800                                           | HOKE. (s.f.). Spun sampling cylinders (Catálogo N.º 79006ENG).<br><a href="http://catalog.hoke.com/Asset/Spun-Sampling-Cylinders-79006ENG_Catalog.pdf">http://catalog.hoke.com/Asset/Spun-Sampling-Cylinders-79006ENG_Catalog.pdf</a>                                              |
| D-105  | Tanque de carga          | Tanque                                                                | 1 L (1000 cc)                                        | Presión atmosférica                                                                          | No identificable                                       | No identificable                                           | Inspección visual (características grabadas en el equipo o accesorio), marzo de 2026                                                                                                                                                                                               |

Como complemento al inventario resumido en la **Tabla 1**, se elaboraron fichas técnicas individuales (*process data sheets*) para los tres equipos de los que se dispuso de información documental suficiente: el separador flash D-101, el tanque de almacenamiento D-103 y la bomba de alimentación P-101. Cada ficha consolida, para el equipo correspondiente, sus condiciones de operación y de diseño (temperatura y presión), los materiales de construcción, las boquillas y conexiones asociadas, y la fuente de la que se obtuvo la información. Estas fichas, presentadas en el **Apéndice E**, constituyen la documentación de respaldo detallada del inventario de equipos y complementan la información condensada en la **Tabla 1**.

De manera análoga, y dada su extensión, el inventario completo de la instrumentación y los elementos de control identificados en el P&ID (válvulas manuales y de retención, reguladores de presión, indicadores de presión y de nivel, filtros y controladores de flujo) se presenta en el **Apéndice F**. Allí se detallan, para cada elemento, su tipo, marca, referencia, condiciones de operación y material. En el cuerpo del documento se conserva únicamente el inventario de los equipos principales (**Tabla 1**).

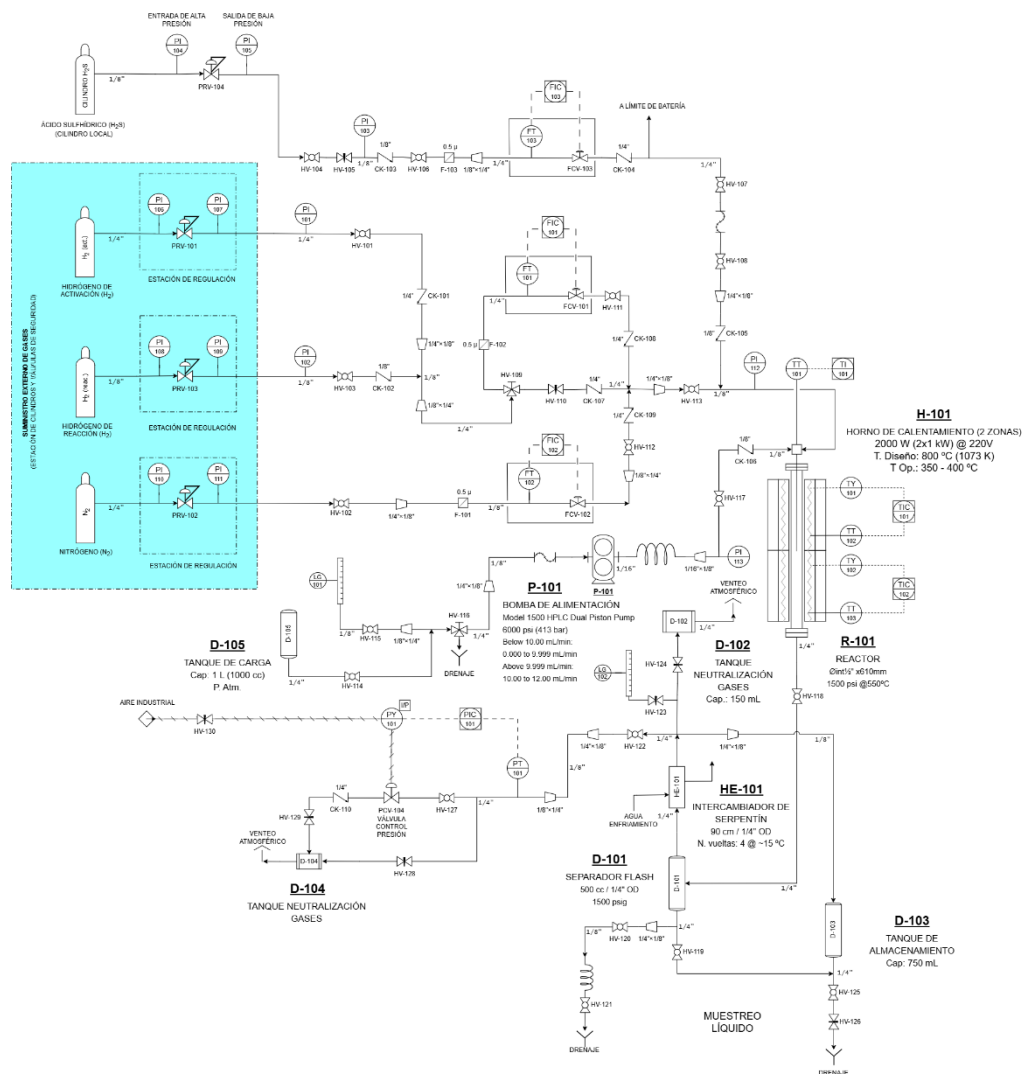
El producto central de esta fase fue el P&ID de la unidad Catatest II, presentado en su versión final en la **Figura 2** y en alta resolución en el **Apéndice G**. Durante su construcción se identificó que gran parte de los equipos y de la instrumentación carecían de una codificación técnica, por lo que se generaron y asignaron los tags correspondientes bajo un criterio unificado, adoptando la norma ANSI/ISA-S5.1 para la simbología e identificación de instrumentos (es posible visualizar imágenes reales de los *tags* adheridos a cada elemento en planta en el **Apéndice H**).

En el caso de las válvulas manuales, se respetó la numeración física ya existente en la planta (HV) para conservar la correspondencia directa entre el diagrama y lo observado en campo. Con

ello, la unidad pasó de carecer de una identificación sistemática de sus componentes a disponer de un esquema normalizado y trazable de equipos, líneas e instrumentación, que constituye la base documental sobre la cual se sustentaron el inventario de equipos y el posterior análisis de riesgos.

**Figura 1.**

*Versión definitiva del Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID) de la unidad experimental Catatest II.*



haberse introducido para completar tramos de tubería con los accesorios disponibles. Si bien las reducciones son habituales en líneas de instrumentación y de bajo caudal, su uso no justificado puede introducir puntos de restricción y variaciones locales de velocidad del fluido, favorecer la aparición de zonas de baja circulación o estancamiento (zonas muertas) y dificultar la estandarización de los accesorios de conexión requeridos para el montaje y el mantenimiento.

Asimismo, se identificó que los recipientes de neutralización de gases D-102 y D-104 corresponden a recipientes plásticos genéricos de carácter provisional, empleados para el tratamiento de corrientes que pueden contener hidrógeno y sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ). Esta condición constituye un hallazgo de seguridad, ya que la compatibilidad del material y la capacidad de contención de dichos recipientes frente a las sustancias manejadas resultan cuestionables, por lo que no son adecuados como equipos permanentes de la unidad.

Durante el levantamiento también se encontró que varios componentes carecen de identificación legible. En particular, varios manómetros (PI) y los reguladores de presión de los cilindros de suministro (PRV) no presentan marca ni referencia visible, por lo que en el inventario se registran como «No identificable». Esta ausencia de trazabilidad dificulta las labores de calibración y mantenimiento, así como el reemplazo de los componentes por equivalentes de especificación comprobable, lo que representa un hallazgo relevante para la gestión de la integridad de la unidad.

#### **4.2 Desarrollo del Manual de Procedimientos Operativos Estándar (SOP)**

El Manual de Procedimientos Operativos Estándar (SOP) de la unidad Catatest II se elaboró a partir del acompañamiento directo a la operación de la planta durante la fase de diagnóstico y se consolidó posteriormente incorporando las recomendaciones derivadas del análisis de riesgos.

El manual se organizó como una guía técnica dividida en cuatro etapas que siguen un orden cronológico de una corrida experimental; cada etapa se subdivide en planes operativos con listas de

verificación (*checklists*) y referencias directas a la instrumentación de la planta (*tags*), de modo que el operador ejecute y controle cada fase de manera independiente.

El manual completo con sus hojas de control, se incluye en el **Apéndice I** de este documento; sin embargo, la **Figura 3** presenta su estructura general:

**Figura 2**

*Estructura del Manual de Procedimientos Operativos Estándar (SOP) por etapas y planes.*



*Nota: Autoría propia. (2026)*

La Etapa 1, alistamiento de la planta, establece las condiciones de hermeticidad antes de iniciar el calentamiento y comprende dos pruebas de estanqueidad separadas por la carga del reactor. En el Plan 1 se realiza una prueba de fugas con el reactor vacío, que valida la hermeticidad del sistema y de las uniones mecánicas antes de introducir el catalizador. En el Plan 2 se carga el lecho catalítico según la estratigrafía definida; para ello es necesario desacoplar y luego reinstalar el reactor, lo que compromete el sello del cabezal. Por esta razón, el Plan 3 repite la prueba de fugas con el reactor ya cargado y revalida en particular las uniones del cabezal afectadas durante la carga. El procedimiento establece que el calentamiento no inicia hasta confirmar la ausencia de fugas bajo presión, con monitoreo en manómetros como el PI-112.

La Etapa 2, acondicionamiento del catalizador, cubre el secado y la activación del catalizador y la preparación de la carga líquida, e integra el control de la central de cilindros para asegurar un flujo constante de los gases de activación.

La Etapa 3, desarrollo de la reacción, estandariza el ajuste de las condiciones de operación, la puesta en marcha y la estabilización de variables, y el protocolo de muestreo, con periodos de espera definidos para asegurar la estabilidad de las muestras. Finalmente, la Etapa 4, apagado prueba y limpieza, ordena la despresurización controlada, el drenaje de tanques y la limpieza de la planta, de manera que la unidad quede en condiciones adecuadas para la siguiente corrida. La **Tabla 2** resume las etapas y los planes que componen el manual.

**Tabla 2**

*Estructura del SOP: etapas, planes y propósito.*

| <b>Etapa</b>                                      | <b>Plan</b>                                                      | <b>Propósito</b>                                                                                             |
|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Etapa 1.</b> Alistamiento de la planta         | <b>Plan 1:</b> Prueba de fu-gas con reactor vacío                | Validar la hermeticidad del sistema y de las uniones mecánicas antes de cargar el catalizador.               |
|                                                   | <b>Plan 2:</b> Cargue del reactor                                | Empaquetar el lecho catalítico según la estratigrafía definida; requiere desacoplar y reinstalar el reactor. |
|                                                   | <b>Plan 3:</b> Prueba de fugas con reactor cargado               | Revalidar la estanqueidad, en especial las uniones del cabezal afectadas durante la carga.                   |
| <b>Etapa 2.</b> Acondicionamiento del catalizador | <b>Plan 1:</b> Secado, activación y preparación de carga líquida | Secar y activar el catalizador y preparar la carga, con control de la central de cilindros.                  |
| <b>Etapa 3.</b> Desarrollo de la reacción         | <b>Plan 1:</b> Acondicionamiento y preparación de la carga       | Ajustar condiciones y cebar las líneas de carga.                                                             |
|                                                   | <b>Plan 2:</b> Puesta en marcha y estabilización                 | Iniciar la prueba y estabilizar las variables de operación.                                                  |
|                                                   | <b>Plan 3:</b> Régimen estacionario y muestreo                   | Operar en estado estacionario y ejecutar el protocolo de muestreo.                                           |
| <b>Etapa 4.</b> Apagado, prueba y limpieza        | <b>Plan 1:</b> Despresurización y drenaje de tanques             | Despresurizar de forma controlada y drenar los tanques.                                                      |
|                                                   | <b>Plan 2:</b> Limpieza de la planta                             | Limpiar la unidad y dejarla lista para la siguiente corrida.                                                 |

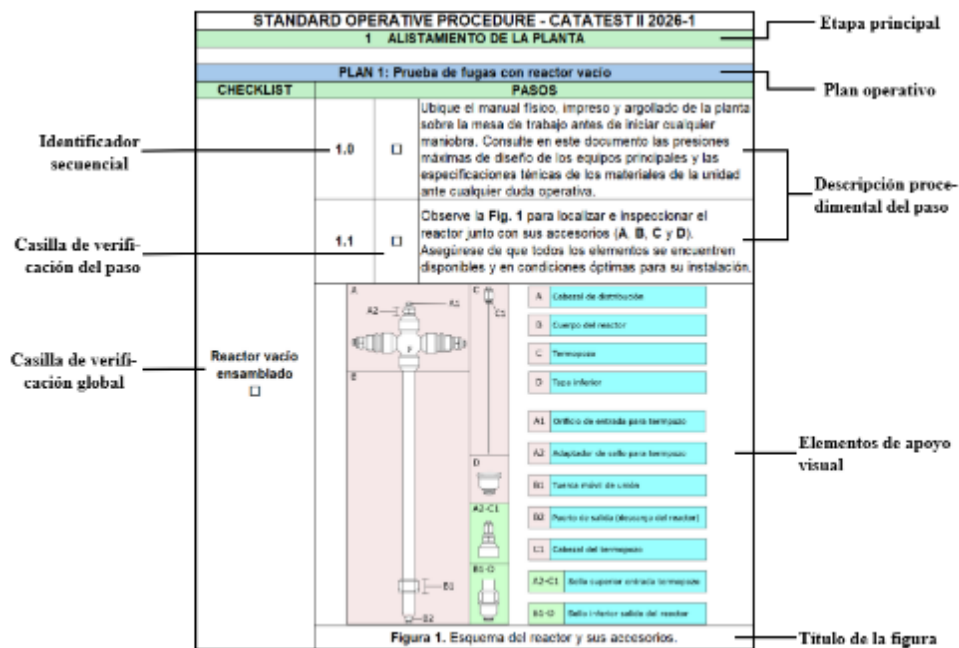
Como resultado del análisis de riesgos, el SOP incorporó buenas prácticas orientadas a la seguridad del proceso, entre ellas la verificación de la línea de salida de gases de los tanques de neutralización hacia el sistema de extracción, el cambio periódico de la solución neutralizante, el uso de un detector personal de  $H_2S$  y pasos explícitos de purga y despresurización controlada. Estas incorporaciones se desarrollan con mayor detalle como estrategias de mitigación en la sección correspondiente, por lo que aquí solo se destacan como aportes del análisis a la seguridad del proceso

Es importante precisar el alcance del SOP dentro de la gestión de la seguridad. El SOP constituye un control de carácter administrativo o procedimental, que depende del cumplimiento por parte del operador y, por lo tanto, reduce la probabilidad de ocurrencia de las desviaciones, pero no su severidad potencial. En eventos asociados a  $H_2S$ ,  $H_2$  o sobrepresión, la severidad de las consecuencias permanece, por lo que el SOP no sustituye a las barreras de ingeniería, como las válvulas de alivio, los detectores fijos o los sistemas instrumentados de seguridad, sino que las complementa fortaleciendo la disciplina operativa ya abordada atrás.

El SOP no se elaboró en una única versión: partió de un borrador preliminar construido durante los acompañamientos operativos de la fase de diagnóstico, que sirvió de insumo para el análisis de riesgos, y fue objeto de aproximadamente cuatro versiones sucesivas hasta consolidar la versión final aquí presentada, incorporando las recomendaciones del análisis y los ajustes verificados en campo. Con el fin de ilustrar su organización, en la **Figura 4** se incluye un ejemplo de una de las etapas del manual.

**Figura 3**

*Estructura metodológica y componentes de diseño de las hojas de control del Manual SOP de la unidad Catatest II.*



*Nota: Autoría propia. (2026)*

#### 4.3 Identificación y Análisis de Riesgos a través de la metodología What-If

El análisis de riesgos de la unidad Catatest II se desarrolló mediante la metodología What-If, sobre la información técnica consolidada en la fase de diagnóstico (tercera versión del P&ID y borrador del SOP). El ejercicio se llevó a cabo en dos sesiones de trabajo, realizadas el 25 de mayo y el 9 de junio de 2026, en las que se formularon y evaluaron nueve escenarios del tipo "¿Qué pasaría si...?", seis en la primera sesión y tres en la segunda. El resumen de los escenarios se presenta en la **Tabla 3**, mientras que su evaluación completa (consecuencia, salvaguardas existentes, nivel

de riesgo, recomendaciones y responsable) se presenta en la **Tabla 4**.

**Tabla 3**

*Resumen de los escenarios evaluados en el análisis What-If.*

| N.º | Sesión      | Escenario (¿Qué pasaría si...?)                                                   | Peligro asociado                                     | Riesgo actual | Riesgo residual |
|-----|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------|-----------------|
| 1   | 25 may 2026 | Falla la válvula que da paso al flujo de H <sub>2</sub> S desde el cilindro       | Pérdida de contención y toxicidad (H <sub>2</sub> S) | M             | L               |
| 2   | 25 may 2026 | El gas en la línea que alimenta H <sub>2</sub> S al reactor se condensa           | Pérdida de contención y toxicidad (H <sub>2</sub> S) | M             | L               |
| 3   | 25 may 2026 | Fuga de corriente eléctrica hacia los componentes metálicos de la unidad          | Eléctrico                                            | L             | N               |
| 4   | 25 may 2026 | Se corta la energía eléctrica durante la operación                                | Eléctrico / falla de proceso                         | M             | N               |
| 5   | 25 may 2026 | El operario deja la válvula HV-117 cerrada durante la operación de la bomba P-101 | Sobrepresión                                         | M             | L               |
| 6   | 25 may 2026 | Taponamiento en la válvula de contrapresión PCV-104                               | Sobrepresión                                         | L             | N               |
| 7   | 9 jun 2026  | Instalación incorrecta del cilindro                                               | Corrosión (H <sub>2</sub> S) / falla de proceso      | L             | N               |
| 8   | 9 jun 2026  | Se satura la solución de los tanques de neutralización D-102 y D-104              | Pérdida de contención y toxicidad (H <sub>2</sub> S) | H             | L               |
| 9   | 9 jun 2026  | Obstrucción en el lecho del reactor R-101 con aumento súbito de presión           | Sobrepresión / falla de proceso                      | L             | N               |

Tabla 4

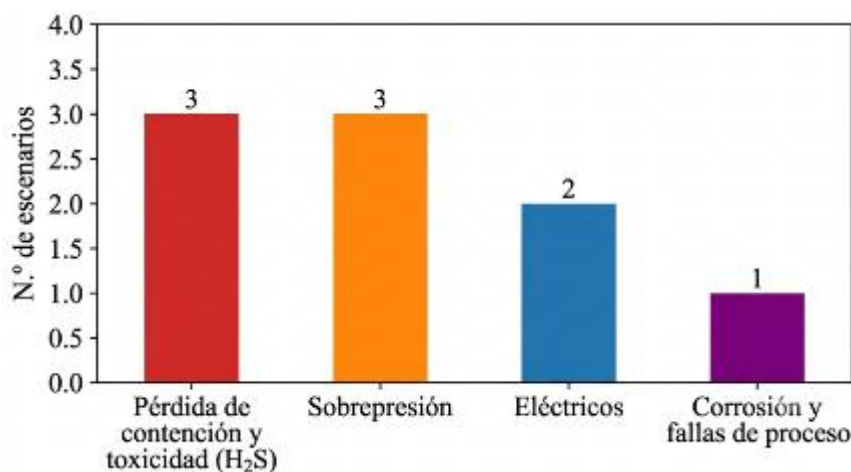
Matriz What If de los escenarios evaluados en la unidad Catatest II.

| N.º | Escenario (¿Qué pasaría si...?)                                                                     | Consecuencia                                                                                               | Salvaguardas existentes                                                                                                               | Riesgo actual | Recomendación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Riesgo residual | Responsable                                                                     |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Falla la válvula que da paso al flujo de H <sub>2</sub> S desde el cilindro.                        | Afectación para la salud del usuario con probabilidad de muerte por asfixia.                               | Las cabinas de extracción; Uso de elementos de protección personal.                                                                   | M             | Mover el cilindro de H <sub>2</sub> S hacia la zona de las casetas; Garantizar que los cilindros se encuentren debidamente anclados; Instalar un detector de H <sub>2</sub> S en la cabina; Dejar una sección de venteo para poder despresurizar la línea; Compra y uso del detector personal de H <sub>2</sub> S.                                     | L               | Victor Baldovino: enviar solicitud de compra de detectores de H <sub>2</sub> S. |
| 2   | El gas en la línea que alimenta H <sub>2</sub> S al reactor se condensa.                            | Afectación para la salud del usuario con probabilidad de muerte por asfixia.                               | Las cabinas de extracción; Uso de elementos de protección personal.                                                                   | M             | Instalar una sección de venteo para purgar / despresurizar la línea; Asegurar el correcto funcionamiento de los sistemas de extracción; Compra y uso del detector personal de H <sub>2</sub> S.                                                                                                                                                        | L               | Victor Baldovino: enviar solicitud de compra de detectores de H <sub>2</sub> S. |
| 3   | Hay una fuga de corriente eléctrica hacia los componentes metálicos de la unidad Catatest II.       | Afectación al usuario por descarga eléctrica.                                                              | Ninguna.                                                                                                                              | L             | Revisión de puesta a tierra de los componentes eléctricos del horno.                                                                                                                                                                                                                                                                                   | N               | Pedro Caldas.                                                                   |
| 4   | Se corta la energía eléctrica durante la operación.                                                 | Pérdida de la corrida debido a que los controladores de flujo másico dejan de funcionar.                   | UPS local en el laboratorio 105 que soporta la operación de los controladores de flujo másico; UPS del parque tecnológico Guatiguará. | M             | Instalar una UPS local del laboratorio 105.                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | N               | Pedro Caldas.                                                                   |
| 5   | El operario deja la válvula <b>HV-117</b> cerrada durante la operación de la bomba <b>P-101</b> .   | Avería de la línea por sobrepresión y posible derrame de la carga líquida.                                 | Ninguna.                                                                                                                              | M             | Instalación de una válvula de liberación con su respectiva línea de retorno hacia un tanque externo.                                                                                                                                                                                                                                                   | L               | Victor Baldovino.                                                               |
| 6   | Se presenta taponamiento en el backpressure <b>PCV-104</b> .                                        | Sobrepresión del sistema.                                                                                  | Se lleva un registro periódico de la presión del sistema de acuerdo con el SOP.                                                       | L             | Instalación de una válvula de alivio en la sección de alta presión que esté conectada al sistema de extracción de gases; Instalación de filtro en la línea de ingreso de carga líquida antes de la bomba <b>P-101</b> ; Verificación de funcionamiento apropiado del agua de enfriamiento en el intercambiador <b>HE-101</b> .                         | N               | Victor Baldovino.                                                               |
| 7   | Se hace la instalación incorrecta del cilindro.                                                     | Daños en el controlador por la presencia de gas corrosivo como el H <sub>2</sub> S; Pérdida de la corrida. | CGA de los cilindros.                                                                                                                 | L             | Etiquetado de todas las líneas de suministro de gases (tanto dentro como fuera del laboratorio).                                                                                                                                                                                                                                                       | N               | Victor Baldovino.                                                               |
| 8   | Se satura la solución presente en los tanques de neutralización <b>D-102</b> y <b>D-104</b> .       | Acumulación de H <sub>2</sub> S en la atmósfera con valores por encima de los límites de disposición.      | Cambio de la solución de soda.                                                                                                        | H             | Capacitación al personal sobre los riesgos asociados a las sustancias con H <sub>2</sub> S; Incluir en el SOP la verificación de la línea de salida de los gases del tanque saturador al sistema de extracción; Incluir en el SOP el cambio de la solución de saturación de NaOH cada 3 meses; Compra y uso del detector personal de H <sub>2</sub> S. | L               | Victor Baldovino.                                                               |
| 9   | Ocurre una obstrucción en el lecho del Reactor <b>R-101</b> , provocando aumento súbito de presión. | Pérdida de la corrida.                                                                                     | El manual operativo contempla una etapa para el cargue correcto del catalizador en el reactor <b>R-101</b> .                          | L             | Capacitación al personal sobre el cargue del reactor; Instalación de un indicador de presión en el tanque <b>D-101</b> para evaluar la caída de presión en el lecho.                                                                                                                                                                                   | N               | Victor Baldovino.                                                               |

A partir del análisis se identificaron los principales peligros asociados a la operación de la unidad, que pueden agruparse en cuatro categorías. La primera corresponde a los peligros por pérdida de contención y toxicidad, asociados a fugas de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), con consecuencias potenciales de intoxicación e incluso asfixia. La segunda son los peligros por sobrepresión, derivados del bloqueo de líneas o del taponamiento de válvulas de control como la PCV-104. La tercera reúne los peligros eléctricos, asociados a fugas de corriente y a la pérdida del suministro eléctrico durante la operación; y la cuarta agrupa los peligros por corrosión y fallas de proceso, como el deterioro de los controladores por contacto con  $H_2S$  o la obstrucción del lecho del reactor R-101. La **Figura 5** muestra la cantidad de escenarios asociados a cada categoría de peligro.

**Figura 4**

*Escenarios evaluados según la categoría de peligro identificada.*

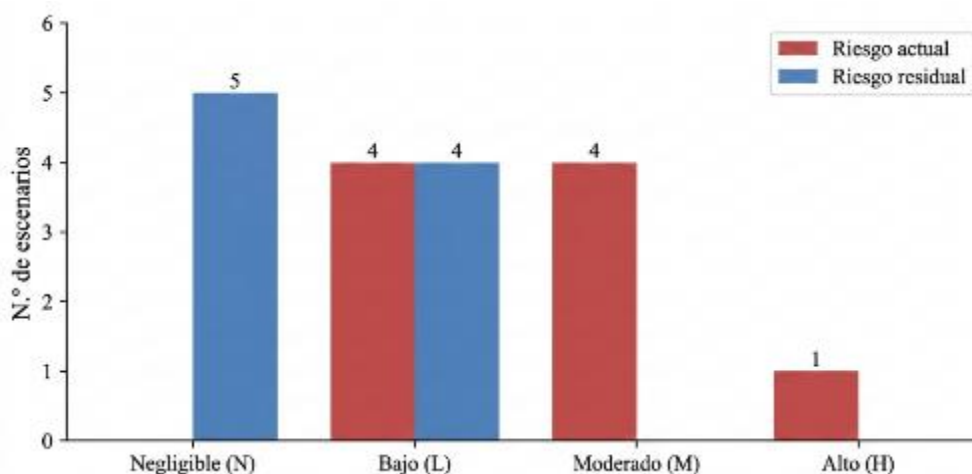


En cuanto a la magnitud, la valoración de los nueve escenarios arrojó, en su condición actual, un escenario de riesgo Alto (H), cuatro Moderados (M) y cuatro Bajos (L). El escenario de mayor nivel de riesgo correspondió a la acumulación de  $H_2S$  en la atmósfera del laboratorio por saturación de la solución neutralizante de los tanques D-102 y D-104, seguido por los escenarios

de fuga y condensación de  $H_2S$  y por el bloqueo de la válvula HV-117. La **Figura 6** presenta la distribución de los escenarios por nivel de riesgo, comparando la condición actual con el riesgo residual estimado tras la aplicación de las recomendaciones.

**Figura 5**

Distribución de los escenarios por nivel de riesgo (actual y residual).



El análisis permitió, además, distinguir entre las medidas de protección ya implementadas en la planta y las nuevas recomendaciones formuladas por el equipo. Entre las medidas existentes se encuentran el sistema de extracción del laboratorio, las cabinas de extracción y la UPS local que respalda los controladores de flujo. Entre las nuevas recomendaciones se cuentan el etiquetado completo de las líneas de suministro de gases, la instalación de válvulas de alivio y de venteo en las secciones de alta presión, la capacitación del personal en el manejo de sustancias con  $H_2S$ , el uso de un detector personal de  $H_2S$  y el cambio periódico de la solución neutralizante. Con la incorporación de estas recomendaciones, el riesgo residual de los nueve escenarios se reduce a cuatro Bajos (L) y cinco Negligibles (N), lo que evidencia la efectividad de las medidas propuestas.

Las recomendaciones derivadas del análisis se organizaron según su horizonte de implementación en acciones de corto, mediano y largo plazo, y constituyen el insumo de las

estrategias de mitigación desarrolladas en la sección siguiente. Uno de los resultados centrales fue el reconocimiento del procedimiento operativo estándar (SOP) como la principal barrera de mitigación de carácter procedimental, dado que buena parte de los escenarios de riesgo se asocian a errores de operación.

#### **4.4 Análisis de la Estrategia de Mitigación**

Tras la identificación y valoración de los escenarios en las sesiones multidisciplinarias, se analizaron de forma sistemática las estrategias de mitigación propuestas. Esta sección evalúa la efectividad esperada de las nuevas salvaguardas, organizándolas bajo el principio de la jerarquía de control de riesgos (reducción en la fuente, controles de ingeniería y controles procedimentales), con el fin de que la unidad Catatest II opere dentro de su intención de diseño.

Es importante señalar que las medidas aquí presentadas corresponden a recomendaciones derivadas del análisis y no a intervenciones ya ejecutadas en la planta; lo efectivamente materializado en este trabajo fue la documentación técnica, correspondiente a la cuarta versión del P&ID y al SOP. En este sentido, el principal resultado de esta fase fue la identificación y la priorización de los riesgos de la unidad, que constituyen una base para futuros proyectos y un punto de referencia, desde la perspectiva de la seguridad, para las mejoras de la planta piloto Catatest II. La **Tabla 5** resume las estrategias propuestas, clasificadas por tipo de control.

**Tabla 5**

*Estrategias de mitigación propuestas, organizadas por jerarquía de control.*

| <b>Estrategia de mitigación propuesta</b>                                        | <b>Tipo de control</b>                               | <b>Peligro o escenario que atiende</b>                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Reubicación de los cilindros de H <sub>2</sub> S a las casetas externas          | Seguridad inherente (reducción de inventario tóxico) | Atmósfera tóxica de H <sub>2</sub> S en el laboratorio por fuga o falla de válvula o regulador |
| Sensores fijos de H <sub>2</sub> S con alarma y detectores personales portátiles | Control de ingeniería (detección)                    | Fugas tempranas de H <sub>2</sub> S no perceptibles por el olfato                              |
| Válvulas de alivio con línea de retorno seguro en la bomba P-101                 | Control de ingeniería                                | Sobrepresión por bloqueo o cierre inadvertido de válvulas                                      |
| Alarma por alta temperatura a partir de la señal del TI-101                      | Control de ingeniería                                | Sobretemperatura por falla de los controladores del horno                                      |
| Recambio de la solución de NaOH cada tres meses (D-102 y D-104)                  | Control procedimental (SOP)                          | Saturación del sistema de neutralización y acumulación de H <sub>2</sub> S                     |
| Etiquetado integral de las líneas de suministro de gases                         | Control procedimental (SOP)                          | Errores de conexión y corrosión por instalación incorrecta                                     |

#### **4.4.1 Fortalecimiento de la seguridad inherente y los controles de ingeniería**

El análisis identificó que la medida de mayor impacto para la integridad del personal sería la reubicación de los cilindros de H<sub>2</sub>S hacia las casetas externas del Parque Tecnológico Guatiguará. El cilindro contiene sulfuro de hidrógeno (99.5%) suministrado por Linde y clasificado como gas extremadamente inflamable y mortal por inhalación (Linde, 2022); por ello, reducir su inventario en el área inmediata de trabajo disminuiría la posibilidad de una atmósfera tóxica persistente dentro del laboratorio ante fallas en las válvulas o el regulador del cilindro. Como capas de detección en el entorno de los operadores, se propuso la instalación de sensores fijos de H<sub>2</sub>S con alarmas audibles y el uso de detectores personales portátiles, que permitirían una respuesta oportuna ante fugas tempranas, difíciles de percibir por el olfato debido a la rápida fatiga olfativa que produce este gas.

En la sección de presurización se identificó que la bomba P-101 carecía de protecciones automáticas ante bloqueos o cierres inadvertidos de válvulas aguas abajo. Como medida de

ingeniería se propuso la instalación de válvulas de alivio de presión calibradas, acopladas a una línea de retorno seguro hacia el tanque de almacenamiento, de manera que la presión del sistema no supere los límites mecánicos de la tubería y se reduzca el riesgo de sobrepresión asociado a errores de operación.

#### **4.4.2 Robustecimiento de los controles procedimentales**

Dado que la unidad de hidrotratamiento depende en gran medida de la intervención manual, el SOP se robusteció como control procedimental orientado a reducir la probabilidad de las desviaciones asociadas a errores de operación. Conviene precisar su alcance: el SOP es un control de carácter administrativo, dependiente del cumplimiento por parte del operador, que reduce la probabilidad de ocurrencia de las desviaciones, pero no su severidad potencial; por esta razón complementa, y no sustituye, a las barreras de ingeniería.

Siguiendo las guías del Center for Chemical Process Safety (CCPS), los resultados de las sesiones se tradujeron en protocolos operativos verificables. Entre las buenas prácticas incorporadas al manual se destacan las siguientes:

**Gestión química de efluentes:** Se propuso el recambio de la solución de soda cáustica (NaOH) en los tanques D-102 y D-104 cada tres meses, para prevenir la saturación del sistema de neutralización de gases residuales.

**Identificación visual:** Se planteó el etiquetado integral de las líneas de suministro de gases, tanto internas como externas, lo que reduce la probabilidad de errores de conexión durante la configuración de la carga y previene la corrosión asociada a instalaciones incorrectas.

**Control térmico:** Se propuso integrar una alarma por alta temperatura a partir de la señal del termopar TI-101, que actuaría como corte del suministro eléctrico del horno ante fallas de los controladores de zona. Al tratarse de una salvaguarda automática, esta medida corresponde propiamente a un control de ingeniería derivado del análisis.

## 5. Conclusiones

Se elaboró la documentación técnica de la unidad piloto de hidrotratamiento Catatest II, que antes de este trabajo no contaba con información integrada ni trazable de su configuración real. A partir del reconocimiento directo en campo se construyó el diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID), consolidado en su cuarta versión, se levantó el inventario de equipos e instrumentación y se elaboró el Procedimiento Operativo Estándar (SOP). Esta documentación constituye el principal producto materializado del trabajo y cierra la brecha de información previa del laboratorio del CICAT.

Mediante la aplicación de la metodología *What If* en dos sesiones de trabajo multidisciplinarias, se identificaron y priorizaron nueve escenarios de desviación operacional. Los escenarios de mayor nivel de riesgo correspondieron a la pérdida de contención y acumulación de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) por saturación de la solución en los tanques de neutralización D-102 y D-104, y a la sobrepresión del sistema por bloqueo de líneas o cierre inadvertido de válvulas. Esta identificación y priorización de los riesgos es, en sí misma, un resultado central del trabajo.

A partir de los escenarios priorizados se propusieron estrategias de mitigación organizadas según la jerarquía de control de riesgos, que incluyen medidas de reducción en la fuente, controles de ingeniería y controles procedimentales. Es importante precisar que estas medidas corresponden a recomendaciones derivadas del análisis y no fueron implementadas en la planta en el marco de este trabajo; por lo tanto, su efecto sobre el riesgo constituye una proyección sujeta a su futura implementación, y no un resultado alcanzado.

El SOP desarrollado fortalece la disciplina operativa de la unidad al estandarizar la secuencia de operación en etapas y planes con listas de verificación. Como control de carácter procedimental, reduce la probabilidad de las desviaciones asociadas a errores de operación, pero no su severidad potencial, por lo que complementa, y no sustituye, a las barreras de ingeniería. Su

efectividad frente a operadores no fue evaluada experimentalmente en este trabajo, por lo que se plantea como una línea de validación futura.

En conjunto, el trabajo entrega a la unidad Catatest II una base documental y un diagnóstico de riesgos que constituyen un punto de partida para futuros proyectos y una referencia, desde la perspectiva de la seguridad de procesos, para las mejoras de la planta piloto.

## 6. Recomendaciones

Las siguientes recomendaciones se orientan a la continuidad del trabajo y a futuros proyectos en la planta piloto Catatest II y en el laboratorio del CICAT.

1. Implementación y validación de las medidas propuestas. Ejecutar en campo las barreras de ingeniería y de detección propuestas (reubicación del cilindro de  $H_2S$ , sensores fijos y detectores personales, válvulas de alivio con línea de retorno y alarma por alta temperatura) y evaluar su desempeño real una vez instaladas.
2. Validación del SOP. Realizar un estudio de validación del procedimiento, por ejemplo, con operadores que no participaron en su elaboración, que permita evaluar su efectividad y la reproducibilidad de la operación.
3. Ampliación del análisis de riesgos. Complementar el análisis con metodologías adicionales, como HAZOP o LOPA, a medida que la planta incorpore nuevos equipos o modos de operación, y actualizar la valoración de los escenarios.
4. Detección fija y respaldo eléctrico. Instalar un sistema de detección fija de  $H_2S$  e hidrógeno con alarmas sonoras y visuales en el laboratorio, y verificar la autonomía y el estado del sistema de respaldo eléctrico (UPS) existente.
5. Evolución hacia sistemas instrumentados de seguridad. Evaluar, a largo plazo, la migración progresiva de las salvaguardas procedimentales hacia sistemas instrumentados de seguridad (SIS) e interlocks en las líneas críticas de alimentación.
6. Gestión documental. Mantener actualizados el P&ID y el SOP mediante un control de versiones, y extender el levantamiento documental y el análisis de riesgos a otras unidades del laboratorio.

### Referencias Bibliográficas

- American Institute of Chemical Engineers (AIChE). (2021). An Overview of Hydrotreating. Wiley/AIChE. pp. 42–47
- American Institute of Chemical Engineers. Center for Chemical Process Safety. (2016). Introduction to process safety for undergraduates and engineers. Wiley.
- Álvarez, M. C., Hoyos, L. J., & Zambrano, L. G. (2012). Modelado del proceso de hidrotratamiento de diésel. *Revista UIS Ingenierías*, 7–14
- Aziz, H. A., Shariff, A. M., & Roslan, M. R. (2012). Managing Process Hazards in Lab-Scale Pilot Plant for Safe Operation. *American Journal Engineering & Applied Sciences*, 5(1), 84-88. <https://thescipub.com/pdf/ajeassp.2012.84.88.pdf>
- Bai, M., Liu, Y., Qi, M., Roy, N., Shu, C. M., Khan, F., & Zhao, D. (2022). Current status, challenges, and future directions of university laboratory safety in China. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 74, 104671. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950423021002771?via%3Dihub>
- Bronkhorst High-Tech B.V. (2025). Instruction manual EL-FLOW® Prestige (Doc. n.º 9.17.084 rev. T). <https://products.bronkhorst.com/media/dtrhzjhu/917084-manual-el-flow-prestige.pdf>
- Bronkhorst High-Tech B.V. (s.f.). LOW- $\Delta$ P-FLOW: Mass flow meters/controllers for low pressure drop or corrosive gas service [Folleto técnico]. <https://www.bronkhorst.com/int/products/gas-flow/low-p-flow/>
- Bullemer, P. T., & Hajdukiewicz, J. R. (2004). A study of effective procedural practices in refining and chemical operations. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 48, 1–5.

<https://www.researchgate.net/publication/228816408> A Study of Effective Procedural Practices in Refining and Chemical Operations

Carapezza, M. L., Ranaldi, M., Tarchini, L., Ricci, T., & Barberi, F. (2020). Origin and hazard of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S emissions in the Lavinio-Tor Caldara zone. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 402, 106985

Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2008). *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures*. Wiley/AIChE. p. 142

Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2023). *Guidelines for Writing Effective Operating and Maintenance Procedures*. Wiley/AIChE. pp. 25–57

Chan, Y. H., Lock, S. S. M., Wong, M. K., Yiin, C. L., Loy, A. C. M., Cheah, K. W., & Lam, S. S. (2023). A state-of-the-art review on capture and separation of hazardous hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S). *Journal of Hazardous Materials*

Chavando, J. A. M., & Cruz, J. (2024). Análisis de riesgos de proceso. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. <https://redica.buap.mx/sites/default/files/Publicaciones/Libro%20ARP%20Chavando%20y%20Cruz%2025sep24.pdf>

Christia-Lotter, A., Bartoli, C., Piercecchi-Marti, M.-D., Demory, D., Pelissier-Alicot, A.-L., Sanvoisin, A., & Leonetti, G. (2007). Fatal occupational inhalation of hydrogen sulfide. *Forensic Science International*

Christia-Lotter, A., Bartoli, C., Piercecchi-Marti, M.-D., Demory, D., Pelissier-Alicot, A.-L., Sanvoisin, A., & Leonetti, G. (2007). Fatal occupational inhalation of hydrogen sulfide. *Forensic Science International*, 169(2-3), 206-209. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2006.03.018>

- Congreso de la República de Colombia. (2008). Ley 1205 de 2008: Por la cual se dictan disposiciones para mejorar la calidad de los combustibles en Colombia. Diario Oficial
- Congreso de la República de Colombia. (2019). Ley 1972 de 2019: Por medio de la cual se establece la protección de los derechos a la salud y al medio ambiente mediante el control de emisiones. Diario Oficial
- Davila Reyna, J. A., & Naranjo Quezada, J. L.(2023) Buenas prácticas de manufactura para optimizar el índice de cetano en la carga a hidrotratamiento de diesel en la Refinería Talara, Piura. pp. 22–25.
- Dávila, R. J. A., & Naranjo, Q. J. L. (2023). Optimización del proceso de hidrotratamiento. pp. 22–25
- Gary, J. H., Handwerk, G. E., & Kaiser, M. J. (2007). Petroleum Refining: Technology and Economics (5th ed.). CRC Press. Capítulo 9: Hydrotreating, pp. 195-214
- HOKE. (s.f.). Spun sampling cylinders (Catálogo n.º 79006ENG).  
[http://catalog.hoke.com/Asset/Spun-Sampling-Cylinders-79006ENG\\_Catalog.pdf](http://catalog.hoke.com/Asset/Spun-Sampling-Cylinders-79006ENG_Catalog.pdf)
- ICATECH. (2023). Indonesia Oil Refinery Unit HAZOP Study. p. 7
- Linde. (2022). Sulfuro de hidrógeno: Hoja de datos de seguridad (P-4611; conforme a la NOM-018-STPS-2015).  
[https://static.pr.d.echannel.linde.com/wcsstore/MX\\_LINDE\\_CatalogueAS/Attachment/Hojas-de-seguridad/MXHS2.6K.pdf](https://static.pr.d.echannel.linde.com/wcsstore/MX_LINDE_CatalogueAS/Attachment/Hojas-de-seguridad/MXHS2.6K.pdf)
- Lowry, P. P., & Wagner, K. A. (2016). Hydrothermal Liquefaction Treatment Hazard Analysis Report (No. PNNL--24219 Rev 3). Pacific Northwest National Lab (PNNL), Richland, WA (United States).  
[https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical\\_reports/PNNL-24219Rev3.pdf](https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-24219Rev3.pdf)

- Lowry, P., & Wagner, K. (2016). Hydrotreater/Distillation Column Hazard Analysis Report (Rev. 2). Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), pp. 22.
- Lyon, B. K., & Popov, G. (2020). The Power of What If Assessing & Understanding Risk. *Professional Safety*, 65(6), 38–45.
- Ministerio de Minas y Energía. (2021). Resolución 40103 de 2021: Por la cual se establece el cronograma de mejora de la calidad de la gasolina motor corriente. Bogotá
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2014, 2019). Pocket Guide to Chemical Hazards: Hydrogen Sulfide. U.S. Department of Health and Human Services
- National Institute for Occupational Safety and Health. (2019). Pocket Guide to Chemical Hazards: Hydrogen Sulfide. U.S. Department of Health and Human Services
- Ness, A. (2015). Lessons learned from recent process safety incidents. Center for Chemical Process Safety, pp. 23–29. <https://www.aiche.org/sites/default/files/cep/20150323.pdf>
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (2020). Process Safety Management of Highly Hazardous Chemicals (29 CFR 1910.119). U.S. Department of Labor
- Pacific Northwest National Laboratory (PNNL). (2016). HAZOP para Hydrotreater – PNNL-25077 Rev.2. pp. 30–35
- Scientific Systems, Inc. (s.f.). Model 1500 dual piston pump: Operator's manual (902492 Rev. P).
- Swagelok Company. (s.f.). Cilindro de toma de muestras DOT 316L-HDF4-500 [Ficha técnica]. <https://products.swagelok.com/es/c/cilindros-de-conformidad-con-dot/p/316L-HDF4-500>
- University of California Center for Laboratory Safety. (2016). Report to the University of Hawai'i at Mānoa on the hydrogen/oxygen explosion of March 16, 2016. <https://cdn.labmanager.com/assets/articleNo/8913/doc/34170/b23d4c6e-e02b-4f4c-8689-6bb2c83ece95-report-201-20uh.pdf>

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2025). Tier 2 and Tier 3 Vehicle and Gasoline Sulfur Programs. EPA Standards