



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

“ANÁLISIS DE RIESGO Y OPERABILIDAD (HAZOP) AL PROCESO DE
ALQUILACIÓN DE OLEFINAS CON H_2SO_4 ”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:

JONATHAN RODRÍGUEZ ROSAS

ASESOR:

ING. RAÚL GÓMEZ GÓMEZ TAGLE

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

Análisis de Riesgo y Operabilidad (HAZOP) al Proceso de Alquilación de Olefinas con H2SO4.

Que presenta el pasante: **Jonathan Rodríguez Rosas**
Con número de cuenta: **411029520** para obtener el Título de la carrera: **Ingeniería Química**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 15 de Marzo de 2017.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dr. Ricardo Paramont Hernández García	
VOCAL	I.Q. Paula Alvarez Fernández	
SECRETARIO	I.Q. I. Raúl Gómez Gómez Tagle	
1er. SUPLENTE	Dr. Julio César Morales Mejía	
2do. SUPLENTE	I.A. Dulce María Oliver Hernández	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

LMCF/cga*

Agradecimientos

Gracias Dios por darme la oportunidad de seguir con mi formación académica universitaria, por permitirme concluir esta etapa de mi vida y darte gracias por todos los conocimientos adquiridos.

A mis padres, yo sé que me estuvieron cuidando y ayudando para alcanzar esta meta tan importante y que sólo con su apoyo, valores y principios que me brindaron, pude concluir la carrera y que gracias a ellos soy la persona que soy, sepan que estoy intentando que estén orgullosos de sus hijos.

A mi hermano Leonel por su incondicional sustento, que no me ha dado la espalda y que tuvimos que esforzarnos para que yo pudiera alcanzar este objetivo, muchas gracias por darme la confianza, por tú perseverancia a pesar de mis tropiezos y por tu gran apoyo.

A mis tíos (as) que me brindaron también su apoyo que aunque a lo mejor nos le podré regresar lo que hicieron por mí durante esta fase, pero espero que estén conscientes de que son parte de este logro y quiero agradecerles sinceramente.

A mis amigos (as) que conocí en la universidad, porque quisieron tenerme como su amigo, como equipo de trabajo y que me brindaron de sus conocimientos y tiempo para que pudiera llevar a cabo este fin.

A mí asesor el Ing. Raúl Gómez, por su ayuda y comprensión brindada para la realización de esta tesis.

A todos los profesores con los que tuve la oportunidad de tomar clase y que sé que estuve con los mejores para ser un mejor estudiante; así como al jurado por su tiempo en la revisión de este trabajo.

A la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán Campo 1 y a la Universidad Nacional Autónoma de México por abrirme sus puertas y tener un lugar para mí.

A todos ustedes muchas ¡GRACIAS!

ÍNDICE

Índice general	
Índice de tablas	
Índice de gráficas	
Índice de figuras	
Introducción	
Justificación	
Objetivos	
Abreviaturas	
CAPÍTULO 1. MANEJO DE LA SEGURIDAD DE LOS PROCESOS QUÍMICOS	14
1.1 Evaluación de peligro: la base del CPSM	16
1.1.1 Consideraciones	18
1.1.2 Metodologías	18
1.1.3 Temas	19
1.1.4 Consideraciones de seguridad y salud	19
1.1.5 Relación de la evaluación de peligro con las estrategias para el manejo de riesgo	19
1.1.6 Aplicación	20
1.2 Evaluación de peligros a lo largo de la vida de un proyecto	20
1.2.1 Accidentes	21
1.2.2 Eventos iniciales	21
1.2.3 Eventos intermedios	22
1.2.4 Resultado del incidente	23
1.3. Métodos de identificación de peligros	24
1.3.1 Análisis de propiedades químicas y condiciones del proceso	24
1.3.1.1 Información de propiedades químicas	25
1.3.1.2 Información sobre las condiciones del proceso	25
1.3.2 Casos de estudio	26
1.3.3 Desarrollo de matrices interactivas	26

1.3.4 Programa de análisis de peligro.....	27
1.3.4.1 Tipos de riesgos.....	28
1.3.4.2 Cuantificación y comparación del riesgo.....	28
1.3.4.3 Ejemplos de grado de riesgo.....	29
1.3.4.4 Criterios de comparación.....	31
1.3.4.5 Criterios para riesgos mayores	32
1.3.4.6 Escenario de especificación.....	32
1.3.4.6.1 Clasificación de riesgo relativo.....	35
1.4 Selección de técnicas de evaluación de peligros.....	47
1.5 Resultados de la identificación de peligros.....	50
CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE RIESGO Y OPERABILIDAD (HAZARD AND OPERABILITY STUDIES, HAZOP)	52
2.1 Procedimientos para el estudio	54
2.2 Aplicaciones.....	59
2.2.1 Plantas de proceso continuo	59
2.2.2 Plantas de proceso intermitente (batch).....	64
CAPÍTULO 3. EL PROCESO DE ALQUILACIÓN	67
3.1 Comparación del ácido fluorhídrico y el ácido sulfúrico en el proceso de alquilación de olefinas	71
3.1.1 Variables en el proceso de alquilación	72
3.2 Reacción química.....	75
3.3 Modelación del reactor	75
3.4 Cinética y termodinámica de la alquilación.	76
3.5 Condiciones de operación	77
3.6 Simulación de la planta de alquilación de olefinas con ácido sulfúrico	78

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RIESGO Y OPERABILIDAD (HAZOP) AL PROCESO DE ALQUILACIÓN DE OLEFINAS CON H₂SO₄

4.1 Antecedentes de accidentes e incidentes.....	87
4.2 Metodología de identificación y jerarquización.....	87
4.3 Modelos de simulación de riesgos	89
4.4 Zona intermedia de salvaguarda.....	90
4.5 Radios potenciales de afectación y su simulación de eventos riesgosos del proceso	101
4.6 Señalamiento de las medidas de seguridad y preventivas en materia ambiental.....	111
4.7 Recomendaciones técnico-operativas	112
CONCLUSIONES	116
ANEXOS	118
REFERENCIAS	131

Índice de Tablas

Capítulo 1

Tabla 1-1. Ejemplos de datos sobre las propiedades de material común para la identificación de peligros	25
Tabla 1-2. Categorías de riesgo ambiental.....	28
Tabla 1-3. Riesgos de seguridad operacional.....	29
Tabla 1-4. Resumen de la puntuación relativa para las categorías de riesgo	31
Tabla 1-5. Lista de las fallas y escenarios básicos que pueden causar una liberación accidental de un producto químico peligroso.....	39
Tabla 1-6. Información típica disponible a los analistas de peligros.....	49

Capítulo 2

Tabla 2-1. Lista de palabras guía del método HAZOP	53
Tabla 2-2. Ejemplo de palabras guías y desviaciones correspondientes del análisis HAZOP.....	54
Tabla 2-3. Resumen de clasificación de riesgos	56
Tabla 2-4. Estudio de operabilidad del proceso de dimerización de olefinas: resultados de la sección de tubería desde el almacenamiento intermedio hasta el tanque de acumulación de carga/sedimentación.....	61

Capítulo 3

Tabla 3-1. Características del octano y presión de vapor de los principales reactivos y productos del alquilado	71
Tabla 3-2. Efecto del tipo de olefina en el número de octano de alquilado.....	72
Tabla 3-3. Condiciones de alimentación de hidrocarburos.....	77
Tabla 3-4. Alimentación ácida para el reactor	77
Tabla 3-5. Valores totales de los productos.....	81
Tabla 3-6. Materiales para recipientes a presión o tanques atmosféricos.....	84
Tabla 3-7. Sustancias empleadas en el proceso de alquilación	84
Tabla 3-8. Sustancias altamente riesgosas que se manejan en el proceso	85

Capítulo 4

Tabla 4-1. Desviaciones típicas para cada sección de proceso	91
Tabla 4-2. Categorías de evaluación de consecuencias	93
Tabla 4-3. Categorías de evaluación de frecuencias de incidentes.....	93
Tabla 4-4. Matriz de caracterización y jerarquización de riesgos	94
Tabla 4-5. Índice ponderado de riesgos	94
Tabla 4-6. Lista de eventos identificados mediante el análisis HAZOP y evaluación por matriz de jerarquización de riesgos del proceso.....	96
Tabla 4-7. Eventos de riesgo identificados en el análisis HAZOP para el análisis de consecuencias.....	102
Tabla 4-8. Valores límite de radiación.....	103
Tabla 4-9. Densidades mínimas de aplicación de espuma.....	115

Índice de Figuras y de Gráficas

Capítulo 1

Figura 1-1. Modelación de las zonas de riesgo por una bola de fuego de gas propano	23
Figura 1-2. Determinación de zonas intermedias de salvaguarda	33
Gráfica 1-1. Matriz de rangos de riesgo	30
Gráfica 1-2. Matriz operacional primaria de riesgo-seguridad	32
Gráfica 1-3. Riesgo-Beneficio	34
Gráfica 1-4. Clasificación de las unidades de instalaciones o procesos	37
Gráfica 1-5. Implementación típica de técnicas de evaluación de peligros.....	49

Capítulo 2

Figura 2-1. Diagrama de flujo para el método de análisis HAZOP.....	57
Figura 2-2. Secuencia detallada del HAZOP	58
Figura 2-3. Sección de carga de la Planta de Dimerización de Olefinas.....	59
Figura 2-4. Ejemplo de reacción: $A + B \rightarrow C$	64

Capítulo 3

Figura 3-1. Diagrama de bloque del proceso de alquilación.....	67
Figura 3-2. Diagrama del proceso de alquilación de ácido sulfúrico auto-refrigerado.....	68
Figura 3-3. Diagrama de bloques para la unidad de alquilación de ácido sulfúrico refrigerado efluente de Stracto.....	68
Figura 3-4. Reactor de Stratco.....	69
Figura 3-5. Modelo de procesamiento de efluentes detallado.....	80
Figura 3-6. Simulación de la planta de alquilación con el PRO II.....	82
Figura 3-7. Diagrama de flujo del proceso de alquilación.....	83

Capítulo 4

Figura 4-1. Nodos de estudio en el DTI	92
Figura 4-2. Máxima concentración por evaporación del ácido sulfúrico de los evento 7, 8, 19 y 20.....	105
Figura 4-3. Máxima concentración por evaporación del ácido sulfúrico de los eventos 9 y 21.....	107
Figura 4-4. Máxima concentración por evaporación del ácido sulfúrico del evento 13.....	109
Figura 4-5. Formación de una nube de vapor flamable del evento 13	110
Figura 4-6. Diagrama de una red de agua contra incendio.....	115
Gráfica 4-1. Gráfica de la liberación masiva de los escenarios 7, 8, 19 y 20.....	105
Gráfica 4-2. Gráfica de liberación por fuga de los escenarios 9 y 21	107

Introducción

Dentro de la Industria Química hay una creciente preocupación por aplicar métodos sistematizados para eliminar o reducir los riesgos, debido a que la sociedad en general, reclama a la industria una mayor seguridad para sus miembros, propiedades y del medio ambiente. La necesidad de evaluar el riesgo ambiental surge, de la importancia de preservar los ecosistemas, a la población y sus bienes circundantes a los sitios en donde se efectúan actividades riesgosas.

En la presente tesis mencionare los diferentes tipos de evaluación del riesgo, los más importantes y las características de cada uno de ellos. Explicare más a detalle, para conocer y entender más acerca del análisis de riesgo y operabilidad HAZOP y sus aplicaciones.

La simulación del proceso de alquilación, con el software PRO II, es una herramienta que emplearé para conocer las condiciones de operación y el funcionamiento de esta planta de alquilación. Y con la elaboración del diagrama de tubería y de instrumentación, identificaré y evaluaré los riesgos de seguridad.

Mediante el análisis de riesgo HAZOP, demostrare la identificación de todos los riesgos reales y potenciales que podría existir en esta unidad operativa, y con el programa de simulación ALOHA modelare las zonas de riesgo que pueden alcanzar altas concentraciones de sustancias tóxicas provenientes de una fuga gaseosa o por el derrame de un líquido que se evapora y así reducir o tomar las acciones preventivas en caso de un accidente.

Justificación

Aplique la metodología HAZOP; para adquirir la experiencia y conocimiento en la identificación y evaluación de los riesgos en la industria; además de que, esta técnica de evaluación, utiliza un enfoque creativo y sistemático para identificar los peligros y problemas operativos que han resultado de desviaciones al intento del diseño de un proceso, que podrían llegar a consecuencias indeseables y así finalmente poder hacer las recomendaciones o acciones para reducir los riesgos.

Me enfoque en el proceso de alquilación; debido a la obtención combustibles alternativos, es decir, libres de plomo y bajos en azufre, la reducción en los niveles de aromáticos y disminuir el contenido de olefinas en la gasolina. La alquilación de olefinas con ácido sulfúrico es debido a la implementación de las modificaciones de la Ley de Aire Limpio de 1990.

Objetivos

General

- Desarrollar un análisis de riesgo y operabilidad (HAZOP), al proceso de alquilación de olefinas con ácido sulfúrico, para eliminar o reducir los riesgos reales o potenciales que puedan presentar un peligro para la salud, al medio ambiente o a las viviendas, tomando como base los resultados obtenidos de la simulación de un caso de estudio.

Particulares

- Proporcionar a los alumnos de la carrera de Ingeniería Química información básica para desarrollar las técnicas de evaluación de riesgo en la industria química.
- Hacer la simulación con el software PRO II, de la planta de alquilación de olefinas con ácido sulfúrico, para definir las condiciones de operación del proceso.
- Crear la ingeniería básica y la ingeniería de detalle a un diagrama de tubería e instrumentación del proceso de alquilación para poder identificar y evaluar los riesgos de operabilidad.
- Determinar con el programa ALOHA, las zonas de afectación en caso de una fuga gaseosa o por el derrame de un líquido que se evapora.
- Proponer medidas de prevención para reducir la probabilidad del evento y limitar sus consecuencias hasta un nivel aceptable.

Abreviaturas

API	American Petroleum Institute (Instituto Americano del Petróleo).
ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales).
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (Explosión por expansión de vapor de líquidos en ebullición).
CL₅₀	Concentración Letal media.
EPA	Environmental Protection Agency (Agencia de Protección del Medio Ambiente).
ERPG-2	Es la máxima concentración en aire por debajo de la cual se cree que casi todos los individuos pueden estar expuestos hasta 1 hora sin experimentar o desarrollar efectos serios o irreversibles o síntomas que pudieran impedir la posibilidad de llevar a cabo acciones de protección.
EPCRA	Emergency Planning and Community Right-to-Know Act (Plan de Emergencia y Ley de Derecho a Saber de la Comunidad).
LOCs	El LOCs (Level Of Concern) o nivel de preocupación: representa un área que define las condiciones peligrosas y no peligrosas.
LPM	Litros por minuto.
HAZOP	Hazard and Operability (análisis de riesgo y operabilidad).
HCS	Hazard Communication Standard (Norma de Comunicación de peligros).
HF	Ácido fluorhídrico.
H₂SO₄	Ácido sulfúrico.
IDLH	Peligro inmediato para la vida o la salud humana.
IIE	Índice de Incendio y Explosión.
MTBE	Methyl Tertiary Butyl Ether (Éter metílico de terc-butilo).
NSC	National Safety Council (Consejo Nacional de Seguridad).
NFPA	National Fire Protection Association (Asociación Nacional de Protección Contra incendios).
NRF	Norma de Referencia.
OSHA	Occupational Safety and Health Administration (Administración de Salud y Seguridad Industrial).
PEL	Permissible Exposure Limit (Límites obligatorios de Exposición Permisibles).
PEMEX	Petróleos Mexicanos.
ppm	Partículas por millón (1 ppm es igual a 1 ml/m ³).
Rpm	Revoluciones por minuto.
RTI	Riesgo Tóxico por Inhalación.
SEDESOL	Secretaría del Desarrollo Social.
TLV	“Valor límite Umbral”, límite permisible de concentración.
TLV₈	Valor Promedio Máximo para una jornada normal de trabajo de 8 horas y una semana laboral de 40 horas, a la que pueden estar expuestos casi todos los trabajadores repetidamente día tras día, sin efectos adversos.
TLV₁₅	Valor Promedio Máximo al que una persona puede estar expuesta durante 15 minutos sin que se dañe su salud.
UL	Underwriters Laboratories (Organismo certificador de pruebas).

CAPÍTULO 1

MANEJO DE LA SEGURIDAD DE LOS PROCESOS QUÍMICOS

CAPÍTULO 1. MANEJO DE LA SEGURIDAD DE LOS PROCESOS QUÍMICOS

Cualquiera que sea la industria, existe la posibilidad de una liberación inesperada de líquidos y gases de las sustancias químicas altamente peligrosas, (tóxicas, corrosivas, reactivas, inflamables, explosivas, una combinación de estas propiedades, etc.), más allá de las zonas inmediatamente circundantes a una instalación.

*La probabilidad de que ocurran accidentes que involucren materiales peligrosos que se manejen en las actividades altamente riesgosas, que pueden trascender los límites de sus instalaciones y afectar a la población, los ecosistemas y al ambiente es denominado **riesgo ambiental**.* (Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Actividades Altamente Riesgosas).

Algunos ejemplos de efectos ambientales incluyen:

- Impactos sobre la salud pública (efectos en los humanos).
- Disminución de las poblaciones de especies amenazadas o en peligro de extinción u otras especies valiosas (por ejemplo, especies de peces de valor comercial, especies que se utilizan para fines recreacionales, etc.).
- Pérdida de bienes estéticos o de bienestar social (por ejemplo parques, turismo, etc.).

Una solución para el manejo de un riesgo ambiental es anticipando la posibilidad de liberaciones accidentales de sustancias químicas de las instalaciones y evaluando su impacto potencial de manera tal que éste pueda prevenirse o mitigarse. Esto requiere:

- El reconocimiento de posibles riesgos,
- La evaluación de los posibles eventos peligrosos y la magnitud de sus consecuencias, y
- La determinación de medidas apropiadas para la reducción de estos riesgos.

El manejo de riesgo ambiental se puede definir como:

Probabilidad de que ocurran accidentes que involucren materiales peligrosos que se manejen en las actividades altamente riesgosas, que pueden trascender los límites de sus instalaciones y afectar a la población, los ecosistemas y al ambiente. (Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Actividades Altamente Riesgosas).

El manejo de riesgo ambiental está estrechamente relacionado con el **Manejo de la Seguridad de los Procesos Químicos** comúnmente denominado (Certified Professionalin Supply Management, CPSM). Los accidentes industriales han sido objeto de un alto grado de interés para asegurar el manejo apropiado de materiales peligrosos. Tanto las organizaciones privadas como públicas, incluyendo compañías, grupos industriales y agencias gubernamentales están aprendiendo de estos accidentes y están tratando de mejorar continuamente para que el proceso sea más seguro. (Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 1992).

Están comprometidos a:

- Comprender las causas de accidentes químicos.
- Descubrir los medios de prevenir accidentes químicos.
- Mitigar las consecuencias de accidentes químicos.

El Manejo de la Seguridad de Procesos Químicos (CPSM) es:

La operación de instalaciones que manejan, utilizan, procesan o almacenan materiales peligrosos de una manera que prevén o reducen liberaciones accidentales de sustancias químicas altamente peligrosas al medio ambiente. (Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 1992).

Los objetivos de CPSM son muy similares a los objetivos de manejo de riesgo ambiental. Los mismos son:

- Prevenir liberaciones accidentales o por lo menor reducir la probabilidad de liberaciones accidentales.
- Reducir la posibilidad de exposición al público y al ambiente debido a una liberación accidental.
- Minimizar las consecuencias de tales liberaciones a la comunidad y al ambiente.

Estos objetivos se incorporan en los 12 componentes de un programa de CPSM:

- Responsabilidad: Objetivos y miras.
- Documentar el conocimiento del proceso.
- Revisión y diseño del proyecto de inversión.
- Manejo del proceso de riesgo.
- Manejo del cambio.
- Integridad del proceso y equipo.
- Factores humanos.
- Capacitación y desempeño.
- Investigación de incidentes.
- Normas, códigos y leyes.
- Auditorías y acciones correctivas.
- Expansión del conocimiento de seguridad del proceso.

El manejo del proceso de riesgo; presenta el enlace más fuerte con el manejo de riesgo ambiental e involucra: *La identificación, evaluación y control sistemático de pérdidas potenciales que pueden ocurrir en instalaciones operativas existentes, de futuros eventos como ser incendios, explosiones, liberaciones tóxicas, reacciones descontroladas o desastres naturales.*

Si bien las pérdidas resultantes se miden en términos de costos directos, los impactos sobre empleados y/o el público, propiedad y/o daños ambientales, pérdidas comerciales, penalidades, o responsabilidades fiscales, la posibilidad de experimentar tales pérdidas se considera **riesgosa**.

La práctica de manejo del proceso de riesgo anticipa la posibilidad de pérdidas relacionadas con el proceso y evaluar su impacto potencial para manejarlo efectivamente. Esto requiere:

- El reconocimiento de posibles riesgos.
- La evaluación de la potencialidad de posibles riesgos.
- La evaluación de la potencialidad de eventos peligrosos.
- La evaluación de la magnitud de sus consecuencias.
- La determinación de medidas apropiadas para la reducción de estos riesgos (por ejemplo, medidas para la seguridad del proceso, procedimientos de respuesta para cualquier emergencia).

1.1 Evaluación de peligro: La base de CPSM

La evaluación de peligro es la base de CPSM, debido a que; si los peligros no se identifican y evalúan, no se pueden considerar al implementar medidas para prevenir o reducir la liberación accidental de sustancias químicas, reducir las posibles exposiciones que afecten al público o al ambiente y/o minimizar las consecuencias de las liberaciones.

La evaluación de peligro es:

Una evaluación cuidadosa de los errores de grave consecuencia y las salvaguardas que deben implementarse para prevenir liberaciones de sustancias químicas peligrosas.

El peligro es:

Una condición física o química que tiene el potencial de causar daño al personal, a las instalaciones o al ambiente. (NFR-010-PEMEX-2014). El peligro es una combinación de:

- Un material peligroso;
- El ambiente de trabajo; y
- Ciertos eventos no planeados que pudieran resultar en un accidente.

A fin de poder identificar y evaluar peligros es importante comprender como pueden ocurrir las liberaciones accidentales. Generalmente existe una relación entre la magnitud del peligro y la severidad de un accidente. Por ejemplo, cuanto más grande es el inventario de sustancias químicas peligrosas y cuanto más severas son las condiciones bajo las cuales la sustancia química es manejada, mayor será la posibilidad de que ocurra un accidente.

Los tipos de peligros incluyen inventarios significativos de:

- Materiales inflamables.
- Materiales combustibles.
- Materiales inestables.
- Materiales corrosivos.
- Que puedan provocar asfixia.
- Materiales sensibles a los choques eléctricos.
- Materiales altamente reactivos.
- Materiales tóxicos.
- Polvos combustibles.
- Materiales pirofosfóricos.
- Oxidantes.

Condiciones físicas extremas incluyen:

- Altas temperaturas.
- Temperaturas criogénicas.
- Altas presiones.
- Aspiración.
- Presión cíclica.
- Temperatura cíclica.
- Vibración/cavitación.
- Ionización, radiación.
- Alto voltaje/corriente.
- Corrosión.
- Erosión.
- Masa de reactivos en espacios confinados.

Los estudios de evaluación de peligro proveen información para ayudar a tomar decisiones para mejorar la seguridad y manejar el riesgo de las operaciones. Los estudios de evaluación de peligro generalmente se enfocan hacia temas de seguridad del proceso, como los efectos agudos de liberaciones de sustancias químicas no planeadas sobre el personal de la planta o el público. Si bien su propósito primordial es el de proveer información relacionada con la seguridad, también se pueden usar para investigar asuntos de interés operativo, económico y ambiental.

La función de cualquier estudio de evaluación de peligro es la de:

- Identificar fuentes potenciales de liberaciones accidentales.
- Identificar liberaciones previas en la instalación que han podido tener consecuencias catastróficas.
- Estimar los efectos de varias liberaciones.
- Estimar las consecuencias de tales liberaciones.

1.1.1 Consideraciones

Las evaluaciones de peligros consideran:

- Causas y consecuencias de incendios y explosiones.
- Liberaciones de sustancias químicas tóxicas o inflamables.
- Principales derrames de sustancias químicas peligrosas.

El estudio de evaluación de peligro se enfoca en:

- Los equipos principales.
- La instrumentación desde el punto de vista de modo operativo y modo de falla.
- Las utilidades desde el punto de vista de modo operativo y modo de falla.
- Los incidentes previos que podrían haber tenido efectos catastróficos.

1.1.2 Metodologías

La metodología utilizada para la evaluación de peligros depende del proceso y sus características. Un factor que influye en la selección de una técnica es cuánto se conoce del proceso. ¿Es un proceso que ha sido operado por largo tiempo con poca o ninguna innovación y se va generado amplia experiencia en su utilización? o, ¿Es un nuevo proceso o uno que ha sido cambiado frecuentemente por la inclusión de características innovadoras? Así mismo, el tamaño y la complejidad del proceso influenciarán la decisión con respecto a la metodología apropiada.

Entre las metodologías cabe mencionar:

- ¿Qué si?, (*What if?..*), que son consideraciones de eventos predecibles.
- Listas de Verificación, de posibles fallas del proceso o condiciones peligrosas.
- Estudio de Peligro y Operabilidad (Hazard and Operability, HAZOP).
- Análisis de Modo y Efecto de Fallas (Failure Mode and Effect Analysis, FMEA).
- Análisis de Árbol de Falla (Failure Tree Analysis, FTA).

1.1.3 Temas

La evaluación de peligro debe responder a seis tópicos específicos:

1. Peligros del proceso.
2. Controles de ingeniería y administrativos.
3. Consecuencias de fallas de controles.
4. Ubicación de la planta.
5. Factores humanos.
6. Efectos potenciales al personal en el sitio como consecuencia de la falla de controles (evaluación cualitativa).

1.1.4 Consideraciones de seguridad y salud

Varias consideraciones de seguridad y salud deben incluirse en la evaluación de peligros. Estas incluyen:

- Propiedades químicas y peligros relacionados.
- Precauciones para prevenir la exposición excesiva a sustancias químicas.
- Medidas de control si ocurre contacto directo o por el aire.
- Control de la calidad de materiales brutos para que no ocurran reacciones secundarias o mezclas indeseables.
- Condiciones reactivas (temperatura, presión).
- Proximidad a sustancias químicas reactivas.
- Tasas de reactivos, calorías de las reacciones, tamaño de grupos.
- Control de inventarios de sustancias químicas peligrosas e instalaciones de almacenamiento.
- Peligros especiales o únicos.
- Sistemas de seguridad y su función.

1.1.5 Relación de la evaluación de peligro con las estrategias para el manejo de riesgo

Dos de los elementos de CPSM se enfocan directamente con el tema del manejo de riesgo de la planta y operaciones:

- Examinación del proyecto de inversión; especifica que los estudios de peligro se deben realizar durante toda la vida del proyecto, que típicamente involucraría el uso de técnicas de evaluación de peligro.
- Manejo del proceso de riesgo; que se dirige a la identificación de peligros, evaluación de riesgo y selección de alternativas de control de riesgo durante toda la vida operativa de la instalación.

Otros elementos que también involucran técnicas de evaluación de riesgo. Por ejemplo:

- Mantenimiento.
- Capacitación/entrenamiento.
- Investigación de incidentes.

La evaluación de peligros contribuye al manejo del riesgo al aumentar la comprensión del riesgo asociado con un proceso o actividad planificada o existente. La comprensión del riesgo se aumenta contestando las siguientes tres preguntas:

- ¿Qué puede fallar?
- ¿Qué tan posible es?
- ¿Cuáles serían los impactos?

1.1.6 Aplicación

Los estudios de evaluación de riesgo generalmente involucran la utilización de técnicas cuantitativas. Los resultados de los estudios de evaluación de riesgo se pueden usar para:

- Acentuar los vacíos en los sistemas de manejo de un programa de CPSM.
- Investigar las causas probables de un incidente que ha ocurrido.
- Como parte de un programa de manejo de cambio de una instalación.
- Identificar equipo de seguridad crítico para mantenimiento especial, evaluación o inspección como parte de un programa de integridad mecánica de una instalación.

1.2 Evaluación de peligros a lo largo de la vida de un proyecto

Los estudios de evaluación de peligro deben realizarse a lo largo de la vida de un proceso como una parte integral de un programa de CPSM de una organización. Los resultados de estos estudios pueden ayudar a manejar el riesgo de cada fase del proceso. La evaluación de peligro se puede hacer eficientemente:

- En la etapa inicial de investigación y desarrollo.
- Durante el diseño detallado y la construcción.
- Durante su construcción e inicio de operación.
- Periódicamente a lo largo de la vida operativa.
- Durante la demolición y desmonte.

Al utilizar este enfoque de ciclo de vida junto con otras actividades de CPSM, la evaluación de peligro puede demostrar eficientemente deficiencias en el diseño y operación antes de ubicar, construir u operar una unidad, por lo tanto, utilizando de la manera más efectiva los recursos designados para asegurar la vida segura y productiva de una instalación.

La realización de evaluaciones de peligro de alta calidad a lo largo de la vida de un proceso **no puede garantizar que no ocurrirán accidentes**. Sin embargo, cuando se utilizan como parte de un programa efectivo de CPSM, las técnicas de evaluaciones de peligro pueden proveer valiosa información a los gerentes quienes están decidiendo si deben o cómo pueden reducir el riesgo de operaciones químicas.

1.2.1 Accidentes

Es importante visualizar un accidente como:

Evento indeseado, e inesperado, que ocurre de manera súbita por la realización de una actividad clasificada como altamente riesgosa, causando daños a los bienes, personas, ecosistemas o al ambiente. (Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Actividades Altamente Riesgosas).

Cada evento individual representa una oportunidad para terminar la secuencia del accidente o reducir la severidad del resultado final.

Los eventos que se presentan en un accidente son:

- Eventos iniciales.
- Eventos intermedios.
- Resultado del incidente.

1.2.2 Eventos iniciales

El primer evento en la secuencia de un accidente se denomina evento inicial. Existen varias clases de eventos que pueden iniciar accidentes:

- Falla del equipo o de programas computarizados:
 - Desviaciones del proceso presión, temperatura, tasa de flujo, concentración, fase/estado de cambio, impurezas, etc.
 - Reacción espontánea polimerización, reacción descontrolada, explosión interna, descomposición.
 - Fallas de contención.
 - Mala función del equipo bombas, válvulas, instrumentos, sensores, fallas de enlace, etc.
 - Pérdidas de servicios.
 - Electricidad, gases inertes, agua, refrigeración, aire, fluidos de transferencia calórica, vapor, ventilación.

-
- Fallas en el sistema de manejo:
 - Personal inadecuado.
 - Entrenamiento insuficiente.
 - Falta de controles administrativos y auditorías.
 - Errores humanos:
 - Diseño.
 - Construcción.
 - Operaciones.
 - Mantenimiento.
 - Examinación e inspección.
 - Eventos externos:
 - Condiciones de temperaturas extremas.
 - Sismicidad.
 - Impacto de accidentes cercanos.
 - Vandalismo/sabotaje.

Es posible que el evento inicial pueda ser el único evento en una secuencia de accidente; **si no existe protección contra el mismo y que el evento es tan severo que rebasa la protección existente.**

1.2.3 Eventos intermedios

Normalmente una serie de eventos encadena el evento inicial al resultado del accidente. Estos *eventos intermedios* son las respuestas que toman las características de seguridad ingeniadas y los controles administrativos cuando el evento inicial ocurre. Los eventos intermedios también incluyen condiciones externas y circunstancias bajo las cuales la secuencia del accidente evoluciona que pueden influenciar el resultado de un accidente (por ejemplo, medidas de respuesta a una emergencia pública).

Existen dos tipos de eventos intermedios:

1. Factores que lo propagan:

- Fallas en los niveles establecidos de protección (por ejemplo, un error operacional o falla de una válvula de auxilio).
- Circunstancias que exacerbaban el resultado de una secuencia de accidente (por ejemplo, condiciones meteorológicas adversas).

2. Factores que reducen los riesgos:

- La respuesta exitosa de los sistemas de seguridad ingenieros y controles administrativos.
- Circunstancias fortuitas que reducen la frecuencia esperada de la secuencia del accidente o reducen la severidad del mismo.

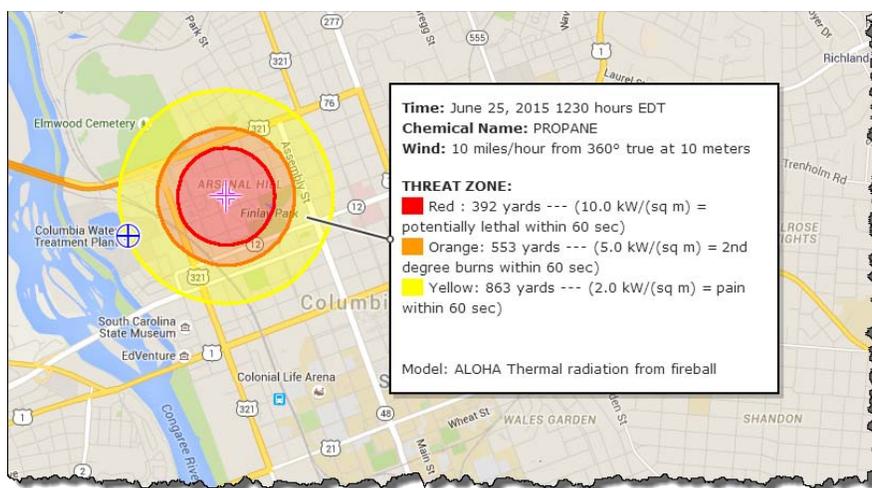
1.2.4 Resultado del incidente

El resultado del incidente puede ocurrir por medio de los siguientes fenómenos:

- Descarga, derrame.
- Lluvia y evaporación.
- Dispersión gaseosa.
- Incendios.
- Explosiones (BLEVE's, bolas de fuego, explosiones confinadas, dispersión de vapores, explosiones de nubes, explosiones físicas, explosiones de polvo, detonaciones, detonaciones de fases condensadas).
- Exposición a sustancias químicas tóxicas.

Las sustancias químicas peligrosas se pueden encontrar en instalaciones permanentes que procesan productos químicos y farmacéuticos y en refinerías de petróleo y otras instalaciones industriales así como en rutas de transporte, como se muestra en la Figura 1-1. Modelación de las zonas de riesgo por una bola de fuego de gas propano en una planta de tratamiento de agua.

Figura 1-1. Modelación de las zonas de riesgo por una bola de fuego de gas propano.



Fuente: Displaying an ALOHA Threat Zone in MARPLOT.

1.3 Métodos de identificación de peligros

Existen peligros asociados con cualquier actividad industrial. Sin embargo, los peligros no se pueden evaluar hasta tanto no sean identificados; la identificación de peligros involucra dos tareas claves:

- La identificación de consecuencias indeseables específicas.
- La identificación de las características del material, sistema, proceso y la planta que podrían producir esas consecuencias.

Por lo tanto, cuanto más precisa sea la definición de las consecuencias de interés, más fácil será la identificación de peligros. Por ejemplo, las consecuencias de la ignición de material explosivo son evidentes por sí mismas, mientras que las consecuencias de almacenar un oxidante y una sustancia inflamable en proximidad muy cerca son menos inminentes aparentemente pero igualmente reales.

Después de definir las consecuencias de interés se puede identificar un sistema potencialmente peligroso y las características de la planta. Es esencial que la técnica empleada para identificar peligros sea:

- Suficientemente completa para identificar todos los peligros importantes.
- Capaz de discriminar entre los peligros más y menos importantes.

Los métodos más comunes para identificar peligros incluyen:

- El análisis de las propiedades del material de proceso y las condiciones del proceso.
- La examinación de las experiencias de los procesos de la organización y de la industria.
- El desarrollo de matrices de interacción.
- La aplicación de técnicas de evaluación de peligros.

1.3.1 Análisis de propiedades químicas y condiciones del proceso

Los procesos propuestos o existentes se basan en la información sobre seguridad de los procesos en dos áreas:

- Los peligros de todas las sustancias químicas generadas como productos finales o subproductos o utilizadas como reactivos, solventes o catalizadores en el proceso.
- La tecnología de equipo utilizado en el proceso.

1.3.1.1 Información de propiedades químicas

Se puede llevar a cabo una identificación inicial de peligros simplemente comparando las propiedades materiales con las consecuencias de interés. Las propiedades típicas de material que sirven para identificar peligros se muestran en la Tabla 1-1. Por ejemplo, si la consecuencia de interés es un incendio, se debe identificar cuáles materiales son inflamables o combustibles. Entonces se clasificarán todos esos materiales como peligros de incendio y realizar evaluaciones de peligro más detallados. Esto se puede visualizar o consultar con las hojas de seguridad de dichos materiales.

Tabla 1-1. Ejemplos de datos sobre las propiedades de material común para la identificación de peligros

Toxicidad aguda	Toxicidad acuática
<ul style="list-style-type: none">• inhalación (LC_{Lo})• oral (LD₅₀)• cutánea	Persistencia en el ambiente
Toxicidad crónica	Nivel de olor
<ul style="list-style-type: none">• inhalación• oral• cutánea	Propiedades físicas
Cancerígeno	<ul style="list-style-type: none">• punto de congelamiento• coeficiente de expansión• punto de ebullición• solubilidad• presión de vapor• densidad o volumen específico• corrosión/erosión
Múgatenos	Reactividad
Tetánico	Estabilidad
Límites de exposición	Inflamabilidad/Explosividad
<ul style="list-style-type: none">• TLV• IDLH	
Degradación biológica	

Fuente: NFPA 704, 1989.

1.3.1.2 Información sobre las condiciones del proceso

Las condiciones del proceso también crean peligros o exacerban los peligros asociados con las sustancias químicas en un proceso. Por lo tanto, no sería suficiente considerar sólo las propiedades químicas cuando se identifican peligros.

1.3.2 Casos de estudio

La experiencia documentada del proceso es otra fuente de información para identificar peligros. Cuando sea posible, se debe utilizar la experiencia de la planta siendo investigada. Los problemas que han ocurrido demuestran donde pueden existir peligros. **La falta de problemas no significa que no existen peligros pero si puede demostrar que los peligros** han sido controlados adecuadamente o que por suerte imprevista una liberación accidental ha sido evitada.

Si los peligros de un proceso bien establecido, están siendo investigados, entonces sería provechoso hacer una comparación con unidades similares. Podrían señalar peligros que no son obvios de una revisión abstracta de las propiedades materiales y condiciones del proceso.

Por ejemplo, el examen de una unidad similar puede indicar:

- Donde han ocurrido las emisiones.
- La causa de las clausuras debido a emergencias.
- La causa de apagones no programados.

1.3.3 Desarrollo de matrices interactivas

La técnica de matriz interactiva es una herramienta simple para identificar interacciones entre parámetros específicos (por ejemplo, materiales, fuentes de energía, condiciones ambientales, etc.). Por razones prácticas, la técnica generalmente considera dos parámetros porque el número de interacciones posibles aumenta según se van considerando más interacciones simultáneas. Se pueden considerar parámetros adicionales para demostrar un mayor grado de interacciones.

Los parámetros que comúnmente se emplean en una matriz interactiva incluyen:

- Sustancias químicas utilizadas en el proceso.
- Condiciones del proceso (por ejemplo, temperatura, presión) bajo condiciones normales y anormales.
- Condiciones ambientales (por ejemplo temperatura, humedad, polvo).
- Contaminantes comunes (por ejemplo, aire, agua, óxido).
- Contaminación de otros materiales que se manejan con el mismo equipo de procesamiento o en la misma área.
- Efectos ambientales (por ejemplo nivel de olores, límites de toxicidad acuática).
- Niveles legales de inventarios, derrames o disposición de desechos.

El tipo y la severidad de las consecuencias conocidas de la interacción se anotan en la célula apropiada de la matriz. Estos resultados se comparan entonces con las consecuencias de interés para identificar los peligros potenciales que requieren mayor evaluación.

1.3.4 Programa de análisis de peligro.

Un programa de análisis de peligro puede ser dividido en tres actividades: Identificación del peligro, análisis de vulnerabilidad, y análisis de riesgo, las cuales definimos a continuación:

- **Identificación de peligro:** La identificación de peligro es el proceso de determinar el "peor caso" más creíble de liberaciones accidentales de químicos tóxicos o químicos peligrosos, incendios, o explosiones. La información necesitada incluye los tipos y cantidades de químicos peligrosos, los tipos de instalaciones industriales peligrosas, y características de peligro (así como liberaciones al aire, incendios, y explosiones) de estas instalaciones. La Norma de Seguridad Operacional de la EPA, define el escenario del "peor caso" como las liberaciones repentinas y completas de la cantidad o más grande dentro de un período de 10 minutos. Sin embargo, a pesar de que este escenario puede tener el mayor impacto inmediato, este no puede ser el peor caso que afecte el planeamiento de emergencia. Una cantidad total menor de una liberación química sobre un período extendido puede resultar más largo, amenazando la concentración de los receptores de viento. Una liberación repentina puede disiparse en un período de tiempo relativo, de modo que "la comodidad en un lugar" es una protección adecuada. Una liberación más pequeña puede hacer "la comodidad en un lugar" y la evacuación un problema, por lo tanto, plantea una amenaza mayor.
- **Análisis de vulnerabilidad:** El análisis y evaluación de la vulnerabilidad depende de los elementos del escenario de especificación y consecuencia de modelado y evaluación. Estos incluyen las causas básicas o mecanismos por los accidentes identificados durante el proceso de identificación del peligro, modelando estos accidentes, y determinando las áreas de la instalación y la comunidad que los rodea que puede ser afectada por las liberaciones en el aire, incendios o explosiones. Para este análisis, se da especial consideración a los receptores sensitivos más cercanos, como escuelas, hospitales, casas, etc.
- **Análisis de riesgo:** En el análisis de riesgo, las probabilidades relativas de los accidentes son examinados, y las consecuencias predichas de los análisis de vulnerabilidad son evaluadas juntas para determinar el nivel de riesgo para la comunidad que los rodea de los escenarios de las liberaciones identificadas.

Los resultados de estos análisis se utilizan en el proceso de planeamiento de emergencia para preparar un plan de respuesta escrito. Los detalles de una respuesta de emergencia apropiada dependen del tipo de emergencia, de la liberación del tóxico químico, incendios, explosiones, o una combinación de estos. Modelando las consecuencias de los accidentes en el análisis de vulnerabilidad puede proveer la información necesaria para calcular la magnitud y el tiempo requeridos en un esfuerzo de respuesta de emergencia.

1.3.4.1 Tipos de riesgos

Existen dos tipos básicos de riesgo asociados a operaciones industriales: El riesgo de seguridad operacional y el riesgo ambiental; ya que ambos contemplan el riesgo a la salud humana. Y ambos pueden acarrear riesgos financieros.

Las categorías generales de riesgo ambiental de las actividades industriales se muestran en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2. Categorías de riesgo ambiental

Área	Riesgo
Aire	Emisión de contaminantes tóxicos. Emisión de radionúclidos. Emisión de contaminantes dañinos.
Agua superficial	Aguas residuales tratadas inadecuadamente. Derrames de productos químicos. Lixiviados. Escapes de agua contaminada.
Agua subterránea	Agua subterránea contaminada. Derrames químicos. Lixiviados. Superficie contaminada o infiltración de agua de lluvia.
Suelo	Disposición inadecuada de residuos químicos. Disposición inadecuada de radionúclidos. Disposición inadecuada de residuos sólidos.
Incumplimiento de la legislación	Excedencia de los límites máximos permisibles. Falta de obtención de permisos. Muestreos y análisis incorrectos. Transferencia de propiedades contaminadas.

Fuente: Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 1992.

Las categorías generales de riesgo de seguridad para las instalaciones industriales se muestran en la tabla 1-3 algunos ejemplos de riesgos específicos dentro de estas categorías.

Tabla 1-3. Riesgos de seguridad operacional

Área	Riesgo
Físicos y químicos	<ul style="list-style-type: none">• Físicos (altura, agua).• Eléctricos.• Mecánicos (equipo en movimiento, tensión).• Materiales peligrosos y exposición química.• Incendios.• Biológicos.
Incumplimiento de la legislación	<ul style="list-style-type: none">• Federal.• Estatal.• Local.
Terceros	<ul style="list-style-type: none">• Quejas de daños y enfermedades.• Quejas del producto y responsabilidades profesionales.

Fuente: Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 1992.

1.3.4.2 Cuantificación y comparación del riesgo

En términos cuantitativos, el riesgo puede ser comparado si se han establecido medidas de cada uno de sus componentes: probabilidad y consecuencias. Debido a que el riesgo por sí solo contiene incertidumbre, un método para medir el riesgo relativo consiste en utilizar un método de puntuaciones cuantitativas y diferentes clases de eventos de riesgo en términos de las dos componentes del riesgo. El método más sencillo consiste en la aplicación de clases de diversos grados, cada una a la probabilidad o frecuencia, y a las consecuencias. Después de procesar los primeros valores resultantes para el riesgo, los eventos son comparados dividiendo las puntuaciones de riesgo en clases, de manera que se mantengan las categorías alta, mediana y baja.

Los riesgos son evaluados o cuantificados de manera que puedan ser comparados, priorizados, y mitigados utilizando un acercamiento racional. Una simple cuantificación rompe el riesgo de un evento en dos partes más fáciles de cuantificar: la probabilidad, o frecuencia de un evento y las consecuencias del evento. La manera clásica de definir el riesgo es entonces la ecuación:

$$\text{RIESGO} = (\text{PROBABILIDAD}) * (\text{CONSECUENCIAS})$$

Fuente: NFR-018-PEMEX-2007

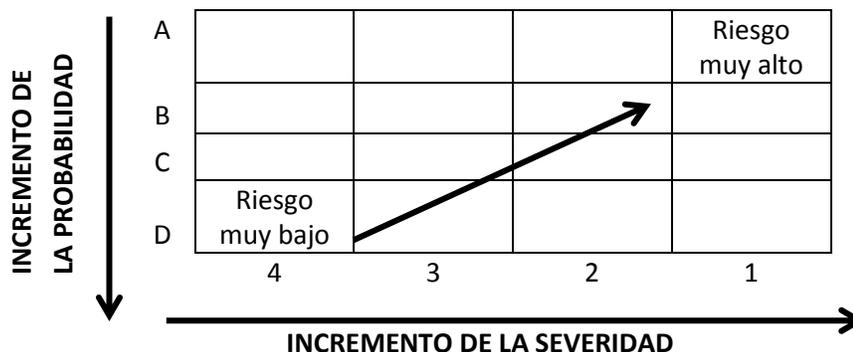
La clasificación de cada componente no es completamente objetiva. Se tienen que hacer estimaciones para la frecuencia relativa y consecuencias relativas basadas en una combinación de criterios objetivos y jurisdicción profesional. La mayoría de los sistemas comparativos de riesgo desarrollan una clasificación completa del mismo, basada en una clasificación separada de la probabilidad de un evento y la severidad de las consecuencias del evento. Los diferentes sistemas utilizan diferentes escalas para ponderar la severidad y probabilidad; sin embargo, las escalas normalmente tienen de 3 a 7 divisiones, del menos a la más severa.

El Consejo Nacional de Seguridad (National Safety Council, NSC), utiliza un sistema de cuatro divisiones y se definen de más a la menos severa como sigue:

- Categoría 1. **Consecuencias catastróficas.** Una o múltiples muertes humanas pueden ocurrir como resultado de un evento en esta categoría.
- Categoría 2. **Consecuencias críticas.** Daños humanos severos pueden ocurrir como resultado de un evento en esta categoría.
- Categoría 3. **Consecuencias marginales.** Daños menores pueden ocurrir como resultado de un evento en esta categoría.
- Categoría 4. **Consecuencias insignificantes.** Efectos no medibles pueden ocurrir como resultado de un evento en esta categoría, pero el evento puede ser una violación de ciertos criterios.

Para cualquier evento operacional o de riesgo, son asignados una categoría de probabilidad y otra de severidad. Una clasificación puede ser representada en una gráfica de dos dimensiones con el aumento de probabilidad en un eje y el decremento de la severidad en el otro. Esta matriz de riesgo destaca los riesgos similares y puede proveer una clasificación relativa de múltiples instalaciones. En la Gráfica 1-1 muestra la matriz de riesgo del NSC.

Gráfica 1-1. Matriz de rangos de riesgo



Fuente: Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 1992.

Otra medida de las consecuencias es la extensión, o efecto total de las consecuencias. Un evento severo que solamente afecta a una persona tiene una mayor extensión de impacto que un evento severo que puede dañar a muchas personas a la vez. La extensión y la severidad son utilizadas conjuntamente en ocasiones, para seleccionar la evaluación global del efecto de las consecuencias. El NSC propone cuatro categorías de exposición que definen la extensión de las consecuencias:

- Más de 50 personas regularmente expuestas al peligro.
- A 49 personas regularmente expuestas al peligro.
- A 9 personas regularmente expuestas al riesgo.
- Menos de 5 personas expuestas regularmente al riesgo.

El riesgo puede ser a corto o largo plazo. Los riesgos a corto plazo son aquellos que ocurren en un período corto de tiempo y que pueden ocasionar consecuencias severas inmediatas. Los riesgos a largo plazo son aquellos que resultan de eventos que no tienen consecuencias importantes en un período corto de tiempo, pero que pueden tener consecuencias significativas en un período largo de tiempo.

1.3.4.3 Ejemplos de grado de riesgo

El grado está basado en un análisis de incidentes potenciales y las consecuencias potenciales de dichos incidentes. La lista de resultados de los grados de riesgo de probabilidad e intensidad se muestra en la Tabla 1-4 y puede ser presentado gráficamente en la Gráfica 1-2 por las plantas T y U.

Tabla 1-4. Resumen de la puntuación relativa para las categorías de riesgo

Producto	Sitio T	Sitio U	Sitio C	Sitio E	Sitio H	Sitio N
Seguridad de operación						
Peligros físicos	1C	4D	3C	4D	3C	4D
Peligros Mecánicos	2B	3C	3B	3C	2C	3B
Tensión mecánica	1C	4C	4C	2C	4C	1C
Peligros eléctricos	3C	1B	3C	1C	1C	3C
Exposición química	3D	3C	2C	3C	3C	3C
Incendios	4D	3B	3C	3C	3D	4D
Explosión	N/A	N/A	4D	2D	N/A	N/A
Peligros de ionización y radiación	N/A	N/A	3D	N/A	N/A	3C

Fuente: Elaboración de autor.

Clave: Grado de intensidad

1: Consecuencias humanas catastróficas

2: Consecuencias críticas

3: Consecuencias marginales

4: Consecuencias insignificantes

Rango de probabilidad

A: Puede ocurrir en un término cercano

B: Probablemente ocurrirá a tiempo

C: Posiblemente puede ocurrir a tiempo

D: Difícil de ocurrir

Gráfica 1-2. Matriz operacional primaria de riesgo-seguridad

A					
B		U	T	U	
C	U	TUU		TT	
D	TU	T			
		4	3	2	1

INCREMENTO DE LA SEVERIDAD

Fuente: Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 1992.

T y UU se refiere a instalaciones específicas. El valor de cada letra en la tabla indica cuántos factores de riesgo en una instalación fueron clasificados en un nivel de riesgo específico.

1.3.4.4 Criterio de comparación

El criterio de Tasas de Accidentes Fatales (Fatal Accident Rate, FAR), se define como el número de muertes por 100 millones de horas (10^8) de exposición de riesgo, o como el número de accidentes fatales sufridos por 1,000 trabajadores durante su tiempo de vida en lugares de trabajo. (Kletz, 1968). A partir de sus investigaciones propuso que ya que el promedio de FAR en la industria química era alrededor de 3.5, cualquier riesgo mayor a 10% de esta cifra, debería ser eliminado como cuestión prioritaria.

Resulta alentador que el promedio anterior de esté compuesto de riesgos altos y bajos y si en el futuro los riesgos mayores se reducen a los niveles del objetivo, inevitablemente se mejorará el funcionamiento en su totalidad. Se observa que estos argumentos se encuentran en una etapa moral y el problema de costo no forma parte de ellos.

1.3.4.5 Criterios para riesgos mayores

Algunos de los criterios que pueden ser empleados provechosamente en la evaluación de incidentes mayores se describen brevemente a continuación:

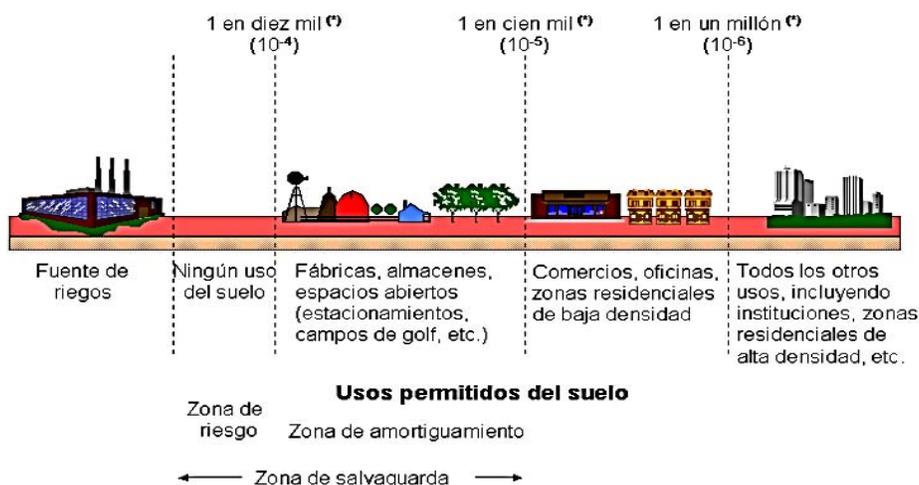
- **Frecuencia del Accidente.** Frecuencia con que ocurren incidente mayores, definiendo como mayores, aquéllos que involucran "varias" muertes. El primer reporte del Comité de Peligros Mayores expresa, que si la evaluación " indica con seguridad razonable que en una planta privada los accidentes graves difícilmente ocurren con una frecuencia mayor de 1 en 10,000 años; esto posiblemente sea considerado dentro de los límites de aceptación, teniendo en cuenta los antecedentes conocidos de riesgos enfrentados, día a día por el público en general".

- **Riesgo social (impacto hacia la comunidad).** El empleo de este criterio, se hace a la relación entre el número de personas que mueren en un accidente (N) y la probabilidad de que ese número sea excedido. El empleo de este concepto permite tomar en cuenta el tamaño de un grupo de personas que pueden ser simultáneamente víctimas en un accidente. Así pues, el concepto de aceptabilidad de los riesgos se basa en la premisa de que los riesgos que se evalúan no deben aumentar de manera significativa los riesgos que los individuos corren en su vida diaria. De ahí que, por lo general, se acepte un aumento de 1% sobre el riesgo individual de muerte, como el criterio para fijar el nivel inaceptable de riesgo, en tanto que se estima el riesgo aceptable utilizando un factor de 10 o 100 por abajo de los riesgos inaceptables.

En la Figura 1-2 se indica que un riesgo de muerte anual de 1 en 10,000 (10^{-4}) derivado de la presencia de una instalación, es considerado como inaceptable por el público general y el área en torno de la empresa caracterizada por tal nivel de riesgo se denomina zona de riesgo. A su vez, un riesgo de muerte de 1 en 100,000 (10^{-5}), permite fijar los límites de lo que se llama la zona de amortiguamiento, en la cual sólo se permiten usos del suelo para actividades que no impliquen la presencia de un número importante de personas.

Por último, un riesgo de muerte de 1 en un 1, 000,000 (10^{-6}), es considerado despreciable, y el uso del suelo más allá de ese límite no tiene ninguna restricción derivada de la presencia de la empresa riesgosa; en tanto que entre ese límite y el anterior se autorizan sólo usos comerciales o zonas residenciales de baja densidad poblacional.

Figura 1-2. Determinación de zonas intermedias de salvaguarda



(*) Riesgo individual anual. Fuente: Consejo Mayor Industrial de Canadá. 1994

-
- **Riesgos individuales- Riesgo por persona por año.** El parámetro "riesgo individual" evalúa la frecuencia del daño como resultado de accidentes mayores en los individuos o en el promedio de un grupo en particular. Cuando se consideran los riesgos existentes en el lugar de una planta de químicos, se puede calcular un promedio de riesgos individuales, mediante la evaluación del total de muertes por año, los incidentes, divididos entre el total de personas expuestas al riesgo. La problemática con este tipo de criterio, basado en el riesgo promedio, consiste en que el riesgo estimado puede reducirse al incrementarse el número de personas sobre las que se promedia. Por lo anterior, sólo tiene valor cuando los riesgos se comportan por todos, o cuando todos tienen el mismo nivel de exposición al riesgo.

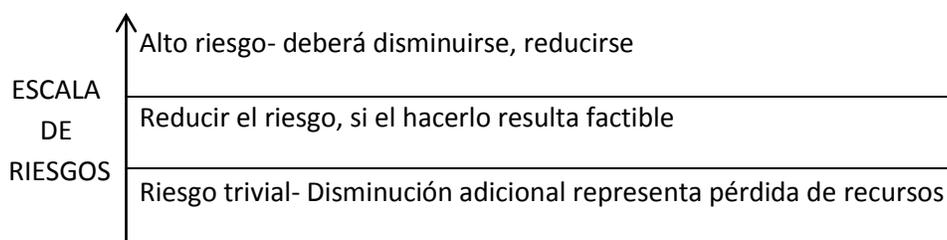
El riesgo individual máximo, puede establecerse por medio del cálculo de riesgo por persona por año para todos los individuos expuestos al riesgo en una planta de químicos, identificando al individuo expuesto al mismo riesgo.

En general, el nivel de riesgo máximo individual que parece ser aceptado se encuentra en el rango de 1 en 10,000 años a 1 en 100,000 años.

- **Riesgo – Beneficio.** Los valores numéricos resultantes no representan únicamente una línea donde arriba de ella, el riesgo es alto e inaceptable, y debajo de ésta, el riesgo es aceptable y tan insignificante que uno requiere de acción alguna para reducirlo.

La Gráfica 1-3, muestra este concepto. Arriba de la línea superior el riesgo es tan alto que no debería ser permitido; debajo de la línea inferior, el riesgo resulta tan trivial que cualquier tipo de acción que se realice para evitarlo, resulta en una pérdida de recursos. En medio de las dos líneas, el riesgo deberá disminuirse a niveles razonablemente prácticos y éste podrá ser permitido si existe un beneficio en la actividad.

Gráfica 1-3. Riesgo-Beneficio.



Fuente: Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers (1992).

1.3.4.6. Escenario de especificación

El escenario de especificación es el proceso en el cual la mayoría de las áreas peligrosas (almacenamiento, proceso y transportación); son elegidas a través de un procedimiento de clasificación, y el escenario de un accidente o la liberación más creíble seleccionada para esas áreas o procesos de peligro. Una vez que se selecciona el escenario de la liberación, se puede determinar la información de las dimensiones del tanque de almacenamiento, el inventario (en almacenamiento o en los contenedores de proceso y en tuberías), los grados de liberación calculados, el almacenamiento o proceso de temperatura y presión, y otra información. Esta información es necesaria para que la evaluación de consecuencia de liberaciones accidentales sea más exacta.

1.3.4.6.1 Clasificación de riesgo relativo

Es el procedimiento para clasificar las áreas de proceso, almacenamiento, y transportación dentro de una instalación de acuerdo al riesgo relativo asociado dentro de estas áreas. El riesgo relativo (el nivel de peligro) debe considerar lo siguiente:

- Tipo de químico.
- Propiedades físicas.
- Inflamabilidad y/o toxicidad (como en IDLH o LOCs).
- Cantidades en almacenamiento, contenedores y tuberías.
- Condiciones de almacenamiento y operabilidad (presión, temperatura).

Estas se combinan de acuerdo con el método de clasificación elegido, para dar un número indicando el nivel de riesgo de cada área, el cual puede ser comparado, y el área o áreas de riesgo más altas pueden ser elegidas por una especificación detallada de escenarios.

Varios métodos de clasificación de riesgo están disponibles y pueden ser simples o complejos. (Bosch, 1992). Una buena revisión de la mayoría de los métodos disponibles, una propuesta y una muestra para un nuevo modelo que incluye **modelos más simples**:

- **La OSHA y la HCS:** Proporcionan información básica acerca de los peligros químicos y sustancias tóxicas en el lugar de trabajo, la OSHA establece los Límites obligatorios de Exposición Permisibles (PEL), para proteger a los trabajadores contra los efectos de la exposición a sustancias peligrosas, incluyendo límites en las concentraciones en el aire de sustancias químicas peligrosas en el aire. La mayoría de los PEL de OSHA son 8 horas promedios ponderados en el tiempo (TWA), aunque también hay límites en el techo y el pico, y muchas sustancias químicas incluyen una designación de la piel para advertir contra el contacto con la piel. Se han establecido unos 500 PEL.

• **Materiales con Riesgo Tóxico por Inhalación (RTI):** Un RTI de un gas o líquido volátil; es tan tóxico que puede causar un riesgo a la salud del ser humano durante su transporte. En ausencia de toxicidad en humanos, se presume que es tóxico para humanos debido a que en animales de laboratorio tuvo un valor de Concentración Letal 50 (CL₅₀) no mayor a 5000 ppm

Para las sustancias tóxicas, la distancia calculada con respecto al efecto toxicológico que se evalúa de acuerdo con los Lineamientos para la Planeación de Emergencias de la Asociación Americana de Higiene Industrial: ERPG-2 o de EPCRA, Sec. 302, donde se compara con la distancia al receptor más cercano. Es importante remarcar que, el término “Zonas de Riesgo” no representa un área o distancia. La asignación de estas zonas es estrictamente en función de su Concentración Letal 50 (CL₅₀). Por ejemplo, una zona de riesgo A es más tóxica que una zona D.

Zona de riesgo A: Gases: CL₅₀ de menor o igual a 200 ppm, líquidos: 5 igual o mayor a 500 CL₅₀ y CL₅₀ menor o igual a 200 ppm

Zona de riesgo B: Gases: CL₅₀ mayor a 200 ppm y menor o igual a 1000 ppm Líquidos: V igual o mayor a 10 CL₅₀; CL₅₀ menor o igual a 1000 ppm, y que no se cumpla el criterio para Zona A de Peligro de Inhalación

Zona de riesgo C: CL₅₀ mayor a 1000 ppm y menor o igual a 3000 ppm

Zona de riesgo D: CL₅₀ mayor a 3000 ppm y menor o igual a 5000 ppm

• **Índice de Incendio y Explosión (IIE):** El método determina el área de exposición, AE, que representaría o daría una idea de la parte afectada por un incendio o explosión generada en la unidad de proceso estudiada. El valor del Índice de Incendio y Explosión, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$IIE = FM \times AE \times F3$$

En donde:

IIE: Índice de Incendio y Explosión.

FM: Factor de material.

F3: Factor de riesgo.

El Factor de Material da una idea de la medida de la intensidad de liberación de energía de una sustancia o preparado. Existen valores para más de 300 sustancias usadas habitualmente en la industria. También establece la posibilidad de calcularlo a partir de unas determinadas propiedades físico-químicas de la sustancia.

Los Factores de riesgo tienen en cuenta las condiciones especiales del proceso; que pueden modificar el riesgo de las instalaciones estudiadas. Hay que tener en cuenta tres tipos de factores de riesgo:

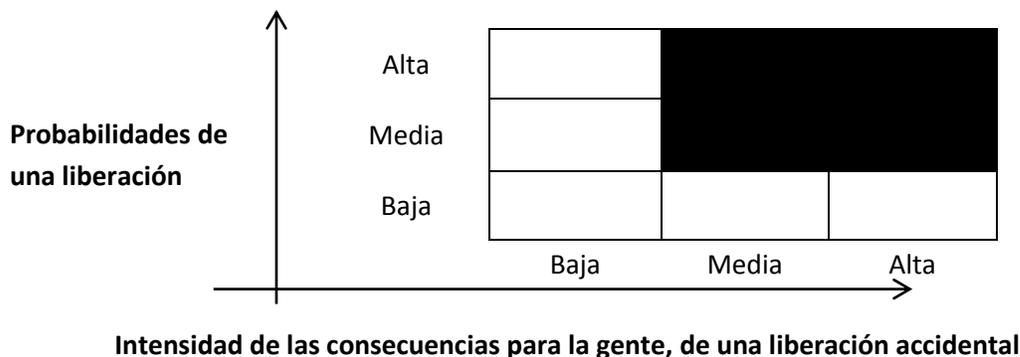
- Factores generales del proceso, F1: reacciones exotérmicas, endotérmicas, transferencias de producto, condiciones de ventilación, etc.
- Factores especiales, F2: toxicidad de las sustancias, considerada como complicación adicional, operaciones a presiones inferiores a la atmosférica, bajas temperaturas, corrosiones, etc.
- Factor de riesgo, F3: calculado a partir de los anteriores $F3 = F1 \times F2$.

Modelos más complejos utilizan estos valores e incluyen parámetros adicionales así como condiciones de operación y tipos de equipo. Estos **modelos más complejos** incluyen lo siguiente:

- **Índices de Dow y Mond:** El método Dow se emplea principalmente como procedimiento de clasificación previa en grandes instalaciones o complejos (refinerías, complejos petroquímicos) para identificar las áreas con mayor riesgo potencial a las que se deben aplicar otro tipo de técnicas de identificación y cuantificación de riesgos. El índice de Mond introduce la toxicidad de las sustancias presentes, y este parámetro se introduce como factor independiente, considerando los efectos de las sustancias tóxicas por contacto cutáneo, inhalación o ingestión.

- **Método de clasificación de la EPA:** Este método consiste en un procedimiento rápido para calcular la zona o área vulnerable del "peor caso" de accidente de una liberación repentina de la cantidad mayor del inventario de un producto químico tóxico dentro de 10 minutos. Entonces se clasifican las unidades de instalaciones o procesos (como son representados en la Gráfica 1-4) de acuerdo con el tamaño de la población afectada y a la probabilidad o similitud de la causa de la liberación.

Gráfica 1-4. Clasificación de las unidades de instalaciones o procesos.



■ Estas combinaciones de conclusiones identifican situaciones de mayor preocupación

Fuente: Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 1992.

-
- **El método de clasificación de riesgo relativo de Radian:** Es similar al de los Índices Dow y Mond en lo que se refiere al método numérico de clasificación que se utiliza y que resulta en una cantidad relativa que representa el riesgo heredado de la unidad o área de proceso. El "número de riesgo" total para una unidad de proceso se obtiene añadiendo valores asignados a cinco categorías que individualmente contribuyen para heredar el riesgo. Estas categorías son:
 - Factor de material de peligro.
 - Reacciones termodinámicas.
 - Condiciones de Intensidad de operación.
 - Factor de equipo peligroso; y
 - El tiempo del proceso.

El Factor de material peligroso se calcula sumando el producto de RTI y la cantidad del inventario o velocidad de flujo másico para cada químico peligroso. Cuando el calor de una reacción exotérmica está involucrado, la cinética de la reacción general indica que la velocidad de la reacción aumentará, por lo tanto, las reacciones altamente exotérmicas de productos químicos peligrosos presentan un peligro mayor que los productos químicos en las reacciones endotérmicas. Se deben considerar procesos de separación para hacer un balance termodinámico.

Los procesos que operan en condiciones elevadas poseen un alto riesgo para ambos por el gran potencial en la pérdida del contenido y las consecuencias de una liberación durante la pérdida ésta. A parte, las temperaturas y presiones más altas generalmente corresponden a una mayor velocidad de liberación.

El factor de equipo peligroso se utiliza para incluir la contribución a un riesgo de los componentes de un proceso que generalmente falla más frecuentemente que otros. Estos componentes de proceso incluyen reactores, intercambiadores de calor final de aire, calentador de proceso de fuego directo, compresores, y turbinas de recuperación de energía que directamente transportan o procesan un material peligroso.

Por último, la edad del proceso está también incluido aquí, siendo que la edad del proceso también contribuye al riesgo. Los procesos nuevos tienden a caracterizar el estado de arte del equipo y de los controles, así como los procesos más antiguos caracterizan tecnologías que no pueden prevenir la pérdida del contenido del accidente. Los procesos más antiguos también pueden requerir actividades de mantenimiento más frecuentes, pues se ha demostrado que son una causa primaria de muchos accidentes en el proceso químico industrial. La similitud de una sustitución impropia de componentes adecuados durante el mantenimiento también aumenta con la edad del proceso.

Después de determinar cuál unidad de proceso posee los riesgos más altos, se necesitan determinar los escenarios básicos que pueden causar una liberación accidental de un producto químico peligroso. A pesar de que estos escenarios dependen del proceso, de las condiciones de operabilidad, de la disposición de equipo, de tipos de equipo, existen factores de contribución generales que pueden ser considerados para cada uno. Estos factores generales incluyen causas externas, operabilidad/mantenimiento/manejo de errores, instrumentos de falla de operación, equipo de falla, y error de diseño. Las fallas y escenarios más específicos para estos factores generales están enlistados en la Tabla 1-5.

Tabla 1-5. Lista de las fallas y escenarios básicos que pueden causar una liberación accidental de un producto químico peligroso

Localización de la liberación accidental	Causa
CAUSAS EXTERNAS	
Falla del equipo en general	Explosión en la planta adyacente.
	Accidentes de tránsito o de trenes afuera de la planta.
	Desastres naturales (inundaciones, derrumbes, temblores, tormentas, etc.).
	Incendio en la unidad de proceso adyacente.
	Explosión en la unidad de proceso adyacente.
	Pérdida del control del proceso como un resultado de la falta de uso.
Falla del proceso en general	Cuarto de control destruido por incendio o explosión.
Tuberías	Colisión con vehículos de la planta.
Contenedores	Una sobrepresión cuando es expuesta al fuego y da como resultado una BLEVE.

FALTA DE MANTENIMIENTO	
Falla del equipo en general	Choque térmico.
	Reemplazo de una parte desgastada con una parte hecha de un material que es incompatible con el proceso.
Falla del proceso general	Pérdida del proceso de control como cuando un valor es operado incorrectamente.
Conectores	Tanques muy llenos como resultado de un error del operador.
	Explosión interna como un resultado de una descarga estática en la presencia de una mezcla inflamable.
	Un colapso debido a una baja de presión cuando el tanque es vaciado y enfriado muy rápido.
	Sobrepresión como resultado de un ajuste incorrecto de la válvula.
Tubería	Sobrepresión causada por la reacción entre material de proceso y material viejo sostenido en una tubería utilizada muy esporádicamente.
Brida	Instalación impropia.
Acomodamiento de tuberías	Mal soldado.
Unión roscada	Instalación impropia.
Válvula	Sobrepresión causada por golpe de ariete.
Operaciones de carga y descarga	Mezclando materiales incompatibles.

INSTRUMENTOS DE FALLA AL OPERAR	
Falla del equipo en general	Pérdida del control de reacción como un resultado de una inadecuada operación del sistema de control.
FALLA DE EQUIPO	
Falla del equipo en general	Inundación y goteo del sistema de aceite caliente.
	Vibración.
	Pérdida del control de proceso como un resultado de la falla del mecanismo de la válvula interna.
Contenedor	Sobrepresión como resultado de una falla de un aparato de relevo.
Casco de barco	Corrosión de impulso.
Tubo de intercambiador de calor	Sobrepresión de un fluido atrapado.
Línea de drenaje de tanques de almacenamiento	Falla de la válvula.
Rompimiento de la tubería	Expansión térmica.
Costuras atornilladas	Corrosión.
Costura soldada	Mala fabricación.
	Corrosión.
	Choque térmico.
	Falla debida a los ciclos de temperatura y presión.
Unión roscada	Corrosión.
Vástago de una válvula	Utilizando sobrepresión.
Válvula	Sobrepresión causada por un golpe de ariete.

Bomba o Compresor	Falla de sellado.
ERROR DE DISEÑO	
Falla del equipo en general	Sobrepresión como resultado de falla de una válvula de escape.
Contenedores	Sobrepresión como resultado de un sobrellenado.
	Pérdida del control de reacción como resultado de una pérdida de mezcla.
	Sobrepresión como resultado de un aparato de escape.
	Explosión interna del tanque causado por una descarga estática en la presencia de una mezcla inflamable.
	Colapso de un tanque como resultado de un enfriamiento y vaciado demasiado rápido.
	Falla por tensión de la boquilla causada por un soporte inadecuado de la tubería.
Tubo de un intercambiador de calor	Sobrepresión de un fluido atrapado.
Venteo de un sistema de cercamiento	Explosión interna causada por la ignición de una mezcla inflamable.
Tubería	Materiales inadecuados de construcción.
	Sobrepresión como resultado de una reacción entre material de proceso y material viejo sostenido en una corriente de tubería poco usual.
Bomba o compresor	Descarga bloqueada, resultado en una sobrepresión.
Operación de carga y descarga	Camiones sobre cargados.

Fuente: Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 1992.

La identificación del peligro es el primer paso para controlar peligros y por esta razón, la evaluación de peligro del manejo de riesgo lo sigue. **La identificación de peligro es cualitativa; y la evaluación del peligro es cuantitativa.**

La evaluación busca determinar la importancia relativa de dos peligros diferentes que han sido identificados y la probabilidad relativa que ocurrirá en un evento peligroso específico. (Center for Chemical Process Safety of American Institute of Chemical Engineers, 1992).

A continuación se proporciona los detalles sobre algunas de las técnicas para la identificación de peligros.

- **Evaluación de seguridad**

La evaluación de seguridad tienen por objetivo identificar las condiciones de la planta o procedimientos de operación que podrían producir un accidente o resultar en daños a personas o propiedad, o al ambiente. Los miembros del equipo necesitan acceso a claves y códigos aplicables para una evaluación completa; descripciones detalladas de la planta incluyendo distribución de las tuberías e instrumentación y del diagrama de flujo; procedimientos de la planta para comenzar y terminar operaciones normales; archivos de mantenimiento, como chequeos de instrumentos críticos, pruebas de las válvulas de auxilio a presión e inspecciones de vasos de presión; y características de materiales de proceso, por ejemplo, información sobre su toxicidad y reactividad. El informe del equipo de inspección incluye desviaciones de las intenciones del diseño tanto de procedimientos autorizados como listas de temas de seguridad recién descubiertos.

Los resultados de una evaluación de seguridad son las descripciones cualitativas de problemas de seguridad potenciales, recomendaciones correctivas, acciones específicas que se necesitan hacer, recomendación de responsabilidades y se indican fechas límites. Una evaluación adicional o una re-inspección se puede planear para verificar que las correcciones se hayan llevado a cabo debidamente.

- **Análisis de lista de verificación**

Este análisis utiliza una lista escrita de rubros o pasos de procedimientos para verificar el estado del sistema. Las listas de verificación se pueden usar para familiarizar al personal sin experiencia con un proceso mediante la comparación de los atributos de un proceso a varios requerimientos de una lista de verificación. También proveen una base común para la revisión administrativa de la evaluación de un proceso u operación.

Las listas de verificación de riesgos genéricos frecuentemente se combinan con otras técnicas de evaluación de riesgos para evaluar las situaciones de peligro. Las listas de verificación están limitadas por las experiencias de los autores; así es que las listas de verificación deben ser formuladas por autores con experiencia variada y peritos en los sistemas que están analizando. Muy a menudo, las verificaciones se hacen mediante la simple organización de información de claves pertinentes y corrientes, normas y regulaciones. Las listas de verificación deben ser revisadas y actualizadas con regularidad.

Para crear una lista de verificación tradicional, el analista define el diseño estándar o práctica de operación y lo usa entonces para generar una lista de preguntas basadas en deficiencias o diferencias. Una lista de verificación completa contiene respuestas de "sí," "no," "no aplicable," o "necesita más información," a las preguntas.

Los resultados son cualitativos y varían según la situación específica, pero generalmente se elevan a una decisión de "sí" o "no" con respecto a si están de acuerdo con procedimientos estándar. Además, conocimiento de estas deficiencias usualmente resultan en una lista fácilmente desarrollada de alternativas de posibles mejoras de seguridad para que considere la administración.

- **Clasificación relativa**

La clasificación relativa es una estrategia que permite que analistas de riesgo comparen las características de varios procesos o actividades para determinar si poseen aspectos riesgosos que son bastante significativos para justificar mayor estudio.

También se puede utilizar para comparar la ubicación de varias fábricas, diseños genéricos, u opciones para la distribución del equipo, y proveer información con respecto a cuál alternativa parece ser la mejor opción o la opción menos riesgosa. Estas comparaciones se basan en valores numéricos que representan el grado de significado relativo que el analista asigna a cada riesgo.

La teoría del método de clasificación relativa tiene sus raíces en las tres preguntas básicas usadas en el análisis de riesgo:

- ¿Qué perturbación puede ocurrir?
- ¿Qué tan probable es?
- ¿Cuáles serían los efectos?

La técnica de clasificación relativa generalmente no está basada en secuencias de accidentes específicos; así es que, normalmente no se presta al desarrollo de recomendaciones específicas para el mejoramiento de seguridad. Generalmente un estudio de clasificación relativa requiere dibujos detallados de los procesos; sin embargo, se necesita usualmente información sobre el nivel máximo de inventarios de materiales, las condiciones de los procesos de planta, y la disposición geográfica de las áreas de almacenamiento de material.

La filosofía del método de clasificación relativa es contestar esas preguntas del análisis de riesgo para determinar la importancia relativa de un proceso o de las actividades desde un punto de vista de seguridad antes de realizar análisis de riesgos adicionales y más costosos. Es que se comparan relaciones aproximadas de procesos atribuidos para determinar cuáles áreas presentan el riesgo relativo más grande.

- **Análisis ¿qué pasa si...?**

La técnica del análisis ¿qué pasa si? es un intercambio de ideas por el cual un grupo de peritos familiarizados con el proceso, hacen preguntas o expresan preocupaciones con respecto a posibles eventos indeseables. El concepto estimula a que el equipo de evaluación de riesgo a formular preguntas que empiezan con ¿qué pasa si? Sin embargo, se puede dar voz a cualquier preocupación de seguridad de proceso sin expresar una pregunta. Por ejemplo:

- Estoy preocupado que nos manden el material equivocado.
- ¿Qué pasa si la bomba A deja de funcionar durante el comienzo del proceso?
- ¿Qué pasa si el operador abre la válvula B en vez de la válvula A?

Subsiguiente las preguntas se dividen en áreas específicas de investigación (usualmente relacionadas con consecuencias de interés), como la seguridad de electricidad, sistema contra incendios, o seguridad del personal. Las preguntas se formulan con base en experiencia y se aplican a dibujos del sistema y descripciones del proceso; para una planta en funcionamiento, la investigación puede incluir entrevistas con el personal de la planta que están representados en el equipo de evaluación de riesgos (puede ser que no haya un patrón específico para estas preguntas a no ser que, el líder provea un orden lógico como la división del proceso en sistemas funcionales). También, las preguntas pueden considerar cualquier condición de la planta que no sea normal y no solo fallas de componentes o variaciones en los procesos.

En su forma más simple, la técnica del análisis ¿qué pasa si? genera una lista de preguntas y respuestas sobre el proceso. También puede resultar en una lista de situaciones peligrosas (sin clasificar o implicar cuantitativamente el escenario del accidente potencial identificado), sus consecuencias, salvaguardas, y opciones posibles para reducir el riesgo.

- **Análisis ¿qué pasa si? /lista de verificación**

La técnica combina los aspectos creativos del análisis ¿qué pasa si? con los aspectos sistemáticos del método de lista de verificación. Este método híbrido usa las ventajas y compensa las desventajas de las dos técnicas. Por ejemplo, el método de análisis de lista de verificación es una técnica basada en experiencia y la calidad de un estudio de evaluación de riesgo usando este método, depende altamente en la experiencia de los autores de la lista de verificación. Si la lista de verificación no es completa, puede ser que el análisis no trate una situación peligrosa de una manera efectiva. La porción de la técnica que corresponde al análisis ¿qué pasa si? estimula al equipo de evaluación de riesgo a considerar accidentes potenciales y consecuencias que están afuera del alcance de la experiencia de los autores de una buena lista de verificación y, por lo tanto, no está en la lista de verificación. Por otra parte, la porción de la lista de verificación de esta técnica presta un aspecto más sistemático que el análisis ¿qué pasa si? Esta técnica combinada puede ser usada en cualquier etapa de la vida de un proceso.

Generalmente, esta técnica se usa para analizar los peligros más comunes que existen en el proceso aunque es capaz de evaluar el significado de los accidentes en casi cualquier nivel de detalle. Un equipo de evaluación de riesgo que usa el análisis ¿qué pasa si?/lista de verificación usualmente genera una tabla de accidentes potenciales, efectos, salvaguardas, y acciones. Los resultados del estudio pueden también incluir una lista de verificación en estilo narrativo para documentar los resultados de estos estudios.

- **Análisis de riesgo y operabilidad (Hazard and Operability Studies, HAZOP)**

El análisis de riesgo y operabilidad fue desarrollado para identificar y evaluar los riesgos de seguridad en una fábrica de proceso, y para identificar problemas de operabilidad, los cuales aunque no peligrosos podrían comprometer la capacidad de la fábrica para lograr su productividad de diseño. Aunque el HAZOP fue formulado para anticipar peligros y problemas de operabilidad con tecnología con la cual las organizaciones tengan poca experiencia, se ha encontrado que tiene un uso muy efectivo con operaciones existentes. El uso de la técnica HAZOP requiere información detallada con respecto al diseño y operación de un proceso. Por lo tanto, se usa más frecuentemente para analizar procesos durante o después de la etapa de diseño detallado. La industria química también puede utilizar variaciones de la técnica HAZOP con otras técnicas.

En el análisis HAZOP un equipo interdisciplinario utiliza un enfoque creativo y sistemático para identificar peligros y problemas operativos que han resultado de desviaciones al intento del diseño del proceso que podrían llegar a consecuencias indeseables. El líder del grupo, con base en su experiencia, guía al equipo sistemáticamente por el diseño de la planta usando un "juego" de palabras fijas (palabras guía). Estas palabras se aplican en puntos específicos o "estudio de nodos" en el diseño de la planta y se combinan con parámetros de proceso específicos para identificar posibles desviaciones del intento de la operación de la planta.

Por ejemplo, la palabra de guía "no" combinada con el parámetro de proceso "flujo" resulta en la desviación "no flujo." A veces el líder utiliza listas de verificación o experiencia con el proceso para ayudar al equipo a desarrollar la lista de desviaciones necesarias que el equipo considerará en reuniones de HAZOP. El equipo entonces acuerda en las posibles causas de las desviaciones (por ejemplo, errores del operador que bloquean la bomba), las consecuencias de desviaciones (por ejemplo, la bomba se recalienta), y las salvaguardas aplicables a la desviación (por ejemplo, una válvula de auxilio de presión en la línea de descarga de la bomba). Si las causas y las consecuencias son significativas y las salvaguardas son adecuados, el equipo puede recomendar una acción para consideración de la administración. En algunos casos, el equipo pueda identificar una desviación con causa realística pero consecuencias desconocidas (por ejemplo, un producto de producción desconocido) y, recomendar estudios consecutivos para determinar posibles consecuencias.

El análisis HAZOP requiere diagramas actualizados y precisos de la tubería e instrumentación (DTI's) y otros informes detallados como ser los procedimientos de funcionamiento. El análisis también requiere bastante conocimiento del proceso, instrumentación, y operación; esta información generalmente la proveen los miembros del equipo que son expertos en estas áreas. Líderes entrenados y con experiencia son esenciales para realizar un análisis HAZOP eficiente y de alta calidad.

Los resultados de un análisis de HAZOP son los fallos del equipo, los cuales incluyen la identificación de los peligros y problemas de operación; recomendaciones para cambios en diseño, procedimiento, etc., para mejorar el sistema; y recomendaciones para llevar a cabo estudios en áreas donde una conclusión no ha sido posible debido a la falta de información. Los resultados de las discusiones del equipo sobre causas, efectos, y salvaguardas sobre desviaciones para cada nudo o sección del proceso se registran en una tabla de formato de columnas.

- **Análisis de modos y efectos de falla**

Un análisis de modos y efectos de falla tabula los modos de falla de equipo y sus efectos en un sistema o planta. El efecto del modo de falla está determinado por la forma en que el sistema responde a la falla del equipo. Identifica modos de falla singulares que resultan directamente en, o contribuyen significativamente a, un accidente. En general, este análisis no examina directamente errores de operador humano; sin embargo los efectos que éstos causen en la operación se indican como un modo de falla de equipo. Un análisis de modos y efectos de falla no es eficiente para identificar una lista exhaustiva de combinaciones de falla de equipo que resultan en accidentes.

Esta técnica engendra una lista sistemática y cualitativa de equipo, modos y efectos de falla. Se incluye una estimado de las consecuencias del peor caso que resultan de fallas singulares. También se puede actualizar con facilidad debido a cambios en el diseño o modificaciones al sistema/planta. Este método requiere los siguientes datos y fuentes de información: un listado del equipo del sistema o planta, o diagramas de tuberías e instrumentos (DTI's), conocimiento de la función del equipo y modos de falla, y conocimiento de la función del sistema o planta y respuestas a fallas del equipo.

1.4 Selección de técnicas de evaluación de peligros

Existen una serie de variables que influyen en la selección de técnicas de evaluación de peligros. Entre estas cabe mencionar los siguientes siete puntos:

- 1.- Motivación del estudio.
- 2.- Tipo de resultados requeridos.
 - lista de peligros.
 - lista de posibles accidentes.
 - lista de alternativas para reducir riesgo o áreas que requieran mayor estudio.

-
- prioridad de los resultados.
 - datos disponibles para un análisis cuantitativo de riesgo.

3.- Tipo de información disponible para realizar el estudio.

4.-Características de análisis del problema:

- Complejidad y tamaño del problema.
- Tipo de proceso (por ejemplo: químico, físico, mecánico, biológico, eléctrico, electrónico, computarizado, humano).
- Tipo de operaciones (por ejemplo: permanente o transitoria; continua, semi-conjunto o en conjunto; instalación fija o sistema de transporte).
- Naturaleza de los peligros (por ejemplo, incendio, explosión, toxicidad, reactividad).
- Tipos de fallas, eventos o situaciones que presentan riesgo (por ejemplo: fallas simples o múltiples; pérdida simple de contención). Por ejemplo, los análisis de árbol de falla, análisis de árbol de eventos, análisis de causa-consecuencia y análisis de fiabilidad se utilizan primordialmente para evaluar situaciones de fallas múltiples y complejas.

5.- Riesgo percibido asociado con el proceso o actividad objeto del estudio:

Cuando el proceso ha operado sin sufrir relativamente ningún accidente durante un largo período y se percibe un potencial muy bajo de un accidente de alta consecuencia y cuando se han hecho pocos cambios en el proceso que invalidarían esta experiencia, se selecciona entonces comúnmente técnicas menos exhaustivas, menos sistemática y de mayor concentración en experiencia como una evaluación de seguridad y un análisis de listas de comprobación. Cuando se percibe lo opuesto, se seleccionan técnicas más rigurosas y predictivas como HAZOP, análisis de ¿qué pasa si?/lista de verificación y análisis de árbol de falla.

6.- Disponibilidad de recursos y preferencia del analista/dirección:

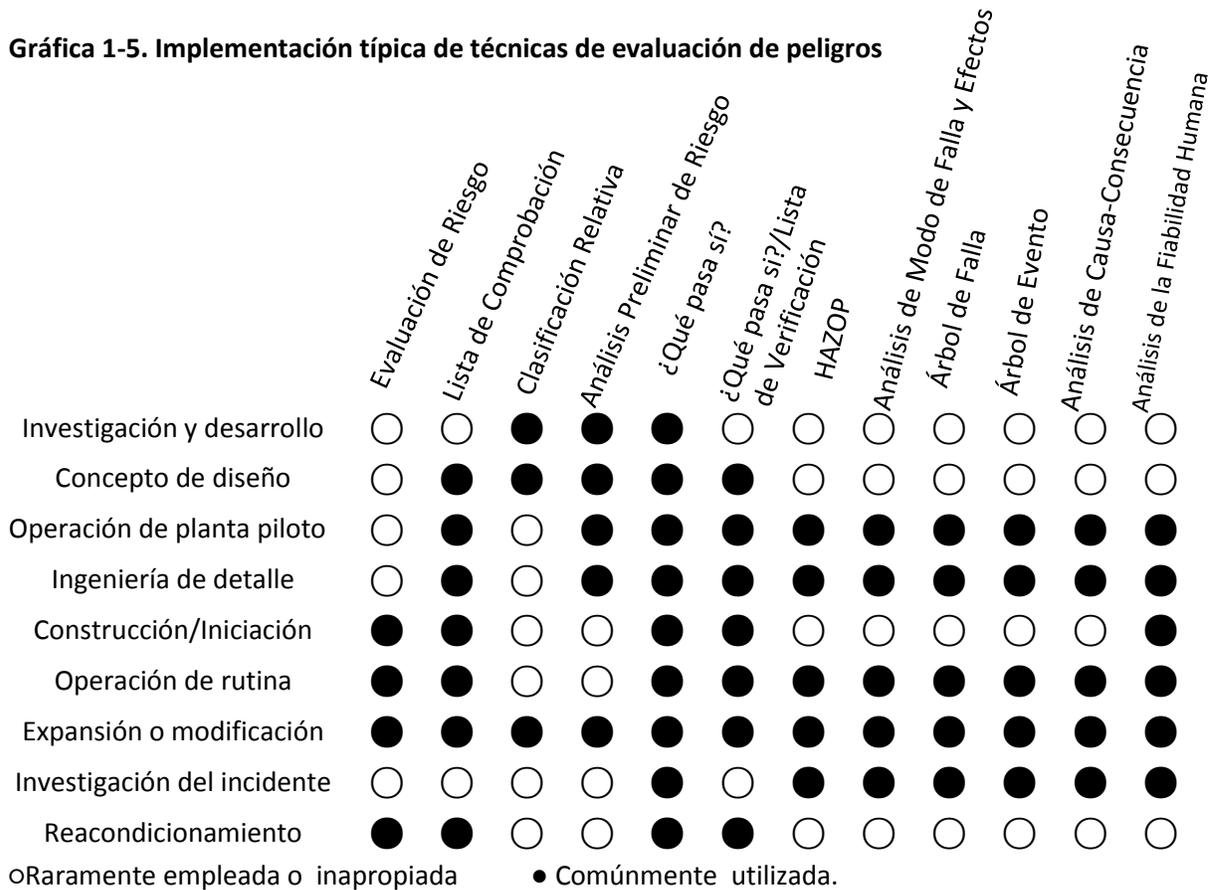
- Personal hábil.
- Fechas límites para realizar el estudio.
- Recursos financieros.
- Preferencia de los analistas de riesgo.
- Preferencia de los gerentes que solicitan la evaluación de peligro.

La Tabla 1-6 muestra la información disponible según evoluciona la planta. En la Gráfica 1-5 muestras las técnicas que comúnmente se utilizan durante las diferentes fases del ciclo de vida del proceso.

Tabla 1-6. Información típica disponible a los analistas de peligros

Tipo de información	Incrementación del Nivel de detalle	Tiempo en que la información se halla disponible a partir de la inceptión de un proyecto
<ul style="list-style-type: none"> • Experiencia operativa específica • Procedimientos operativos • Equipo existente • Instrumentación • Diagrama de flujo del proceso • Experiencia con procesos similares • Inventarios de materiales • Proceso químico básico • Datos materiales, físicos y químicos 		

Gráfica 1-5. Implementación típica de técnicas de evaluación de peligros



Fuente: Gressel & Gideon, 1991.

1.5 Resultados de la identificación de peligros

La identificación de peligros generalmente resulta en listas simples de materiales o condiciones que podría redundar en situaciones peligrosas. Los resultados de la identificación de peligros incluyen:

- Lista de materiales inflamables.
- Lista de materiales tóxicos y subproductos.
- Lista de reacciones peligrosas.
- Lista de sustancias químicas y cantidades que podrían reportarse si son liberadas al ambiente.
- Lista de peligros (por ejemplo toxicidad, inflamabilidad) asociados con el sistema.
- Lista de contaminantes y condiciones de los procesos que podrían resultar en una.
- Reacción descontrolada.

Los resultados de la identificación de peligros se puede utilizar para:

- Definir el ámbito del estudio de evaluación de peligros.
- Seleccionar la técnica apropiada para realizar un estudio de evaluación de peligros.

Una vez identificado y evaluado los riesgos, se analizan las causas y consecuencias, se pueden seleccionar e implementar las medidas de control de riesgo, recomendaciones de los analistas en acciones específicas, recomendaciones correctivas, manuales de prácticas operativas, etc. Dicho control puede ser visto como constituido por tres niveles fundamentales:

- Prevención.
- Protección.
- Mitigación.

El propósito de la prevención es reducir la probabilidad de liberaciones, así como, también se aplica a la protección ambiental como prevención de la contaminación y a la seguridad de proceso como prevención de accidentes.

Las medidas de protección son los equipos y sistemas que previenen o reducen la cantidad de químicos que son descargados en una liberación incipiente que ya ha escapado primeramente de un contenedor. Una vez que un producto químico ha sido liberado al aire o tiene el potencial para internarse en el aire, la primera preocupación son las consecuencias que pueda tener en la planta y en las comunidades vecinas. La reducción de estas consecuencias se refiere a la mitigación. (Center for Chemical Process Safety of American Institute of Chemical Engineers, 1992).

CAPÍTULO 2
ANÁLISIS DE RIESGO Y
OPERABILIDAD
(HAZARD AND OPERABILITY
STUDIES, HAZOP)

CAPÍTULO 2. Análisis de Riesgo y Operabilidad (Hazard and Operability Studies, HAZOP)

- a. Es una técnica para identificar riesgos y problemas, los cuales impiden una operación eficiente.
- b. Es una técnica que permite a la gente liberar su imaginación y revisar en todas las formas posibles en que los riesgos y/o problemas de operación pudieran surgir.
- c. La técnica al ejecutarse en forma sistemática, reduce las posibilidades de que algo se pase sin analizar.
- d. Debe considerarse como un concepto de seguridad del proceso para protección del personal, instalaciones y comunidades.

Para desarrollar un estudio HAZOP se requiere de una descripción completa del proceso y se cuestiona a cada una de las partes de proceso y a cada componente para descubrir qué desviaciones del propósito original para lo cual fueron diseñados pueden ocurrir y determinar cuáles de esas desviaciones pueden dar lugar a riesgos al proceso o al personal.

Los componentes se analizan mediante el empleo de palabras claves o guía, las cuales están concebidas para asegurar que las preguntas exploren todas las posibilidades de que su funcionamiento se desvíe de su intención y propósito de diseño.

Las desviaciones son estudiadas, se determinan sus causas y consecuencias indicando cuáles son las condiciones en que se presentarían.

Descripción de conceptos básicos:

Propósito:	Describe la forma en que se espera funcione el elemento analizado. El propósito puede tomar varias formas, equipos, recipientes, líneas, instrumentación, etc.
Desviaciones:	Son los cambios que se presentan al propósito y puestas al descubrimiento por la aplicación sistemática de las palabras claves. (Presión, temperatura, flujo volumétrico, calor, corrosión, mantenimiento, etc.).
Causas:	Estos son los motivos por los que se pueden presentar las desviaciones. Cuando se demuestra que una desviación tiene una causa real, se considera como una desviación significativa.
Consecuencias:	Son los resultados que se obtendrían en caso de que se presentaran algunas desviaciones.
Riesgo:	Toda fuente de energía. Son las consecuencias que pueden causar daños, lesiones o pérdidas.

Palabras clave o guía Son palabras sencillas que se usan para calificar el propósito; guían y estimulan el proceso de pensamiento creativo para descubrir las posibles desviaciones. La Tabla 2-1 muestra una lista de palabras clave. Las palabras clave se aplican a la intención de diseño que indica lo que el equipo y/o sistema deben realizar. Y en la Tabla 2-2 muestra los ejemplos de palabras guías y desviaciones correspondientes del análisis HAZOP.

Tabla 2-1. Lista de palabras guía del método HAZOP

PALABRAS CLAVE	SIGNIFICADO	COMENTARIOS
No	La negación completa de las intenciones de diseño	Ninguna de las intenciones de diseño se cumplen pero no pasa otra cosa.
Más	Incremento o decremento cuantitativo de la intención	Se refiere a cantidades y propiedades como flujo, gradientes, temperatura, presión y actividades como calentamiento y reacción.
Menos	Un decremento cualitativo	Se refiere a cantidades y propiedades como flujo, gradientes, temperatura, presión y actividades como calentamiento y reacción.
Tanto como	Un incremento cualitativo	Todas las intenciones de diseño y operación se realizan en conjunto con alguna otra actividad adicional.
Parte de	Un decremento cualitativo	Se realiza solamente una parte de las intenciones de diseño y otra parte no.
Contrario a	El opuesto lógico de la intención de diseño	En general se aplica a actividades, por ejemplo flujo inverso o reacción química. Se aplican también a sustancias, por ejemplo, veneno en lugar de antídoto o "D" en lugar de "L" en isomería óptica, etc.
Diferente a	Sustitución completa de la intención de diseño	No se realiza ninguna parte de la intención original de diseño. Sucede una cosa totalmente diferente.

Fuente: ILO/UNEP/WHO International Programmed on Chemical Safety, 1988.

Tabla 2-2. Ejemplo de palabras guías y desviaciones correspondientes del análisis HAZOP

PALABRAS GUÍA	DESVIACIONES
Ninguna	Sin flujo hacia adelante cuando debe o no haber flujo o flujo a contra corriente.
Más de	Más de cualquier propiedad física relevante que deben haber flujos más altos (porcentaje o cantidad total), temperatura más alta, presión más baja, etc.
Menos de	Menos de cualquier propiedad física que debe ser: flujo más bajo (porcentaje o cantidad total), temperatura más baja, presión más baja, etc.
Parte de	Composición de sistema diferente del que debe haber: cambio en porcentaje de componente, componentes faltantes, etc.
Más que	Más componentes presentados en un sistema que debe haber: presencia de una fase extra (sólido, vapor), impurezas (aire, agua, ácidos, productos de corrosión), etc.
Otros que	Que más puede pasar aparte de las operaciones normales: arranque, paro, en operación, corriente baja, modelo alternativo de operación, falla de servicios de planta mantenimiento, cambio catalítico, etc.
Contra corriente	Variable o actividad es contra corriente de lo que debe ser: flujo contra corriente.

Fuente: ILO/UNEP/WHO International Programmed on Chemical Safety, 1988.

2.1 Procedimiento para el estudio

Etapas iniciales con estudios de ingeniería básica plan y programa:

1. Verificación inicial de riesgos:

- Necesidad básica de localizar e identificar los riesgos mayores.

2. Toma de decisiones fundamentales como:

- Localización de la planta.
- Cuál debe ser la localización de la planta nueva en el interior del complejo respecto al límite del lugar, otras plantas, etc.

-
- Cuales aspectos particulares del diseño requieren atención especial en el análisis de riesgos.
 - Se necesita más investigación para obtener datos sobre toxicidad, combustibilidad, reactividad, etc.

3. La identificación de riesgos mayores se facilita al establecer ciertos parámetros generales:

a. Materiales:

- Materias primas.
- Productos intermedios.
- Producto final.
- Efluentes, etc.

b. Operaciones unitarias:

- Destilación.
- Mezclado.
- Evaporación.
- Secado, etc.

c. Distribución de la planta (lay-out).

4. Los parámetros generales se deben considerar de acuerdo a una lista de comprobación de riesgos potenciales:

- | | | | |
|--------------|------------------|--------------------|-------------------|
| • Fuego. | • Ruido. | • Vibración. | • Corrosión. |
| • Explosión. | • Detonación. | • Producto nocivo. | • Radiación. |
| • Toxicidad. | • Electrocutión. | • Asfixia. | • Falla mecánica. |

- **Clasificación de riesgos:**

CLASE I SEGURO:

Condiciones en las que el error humano, diseño deficiente o inadecuado, o falla del equipo no o al personal.

CLASE II MARGINAL:

Condiciones en las que el error humano, diseño deficiente o inadecuado, o falla del equipo puede degradar el funcionamiento del sistema o dañar al equipo, pero que se puede arreglar por el personal o sistema de control sin que se presenten daños serios al personal.

CLASE III CRÍTICO:

Condiciones en la que el error humano, diseño deficiente inadecuado, o falla del equipo causarán daños de consideración al equipo y personal o que resultan en un riesgo que requiera de acción correctiva inmediata para la sobrevivencia del personal y del sistema.

CLASE IV CATASTRÓFICO:

Condiciones en las que el error humano, diseño deficiente o inadecuado, o falla del equipo puede degradar severamente el funcionamiento del sistema y causa la pérdida subsecuente del sistema o causar la muerte o daños serios e irreversibles al personal. En la Tabla 2-3 se muestra el resumen de esta clasificación.

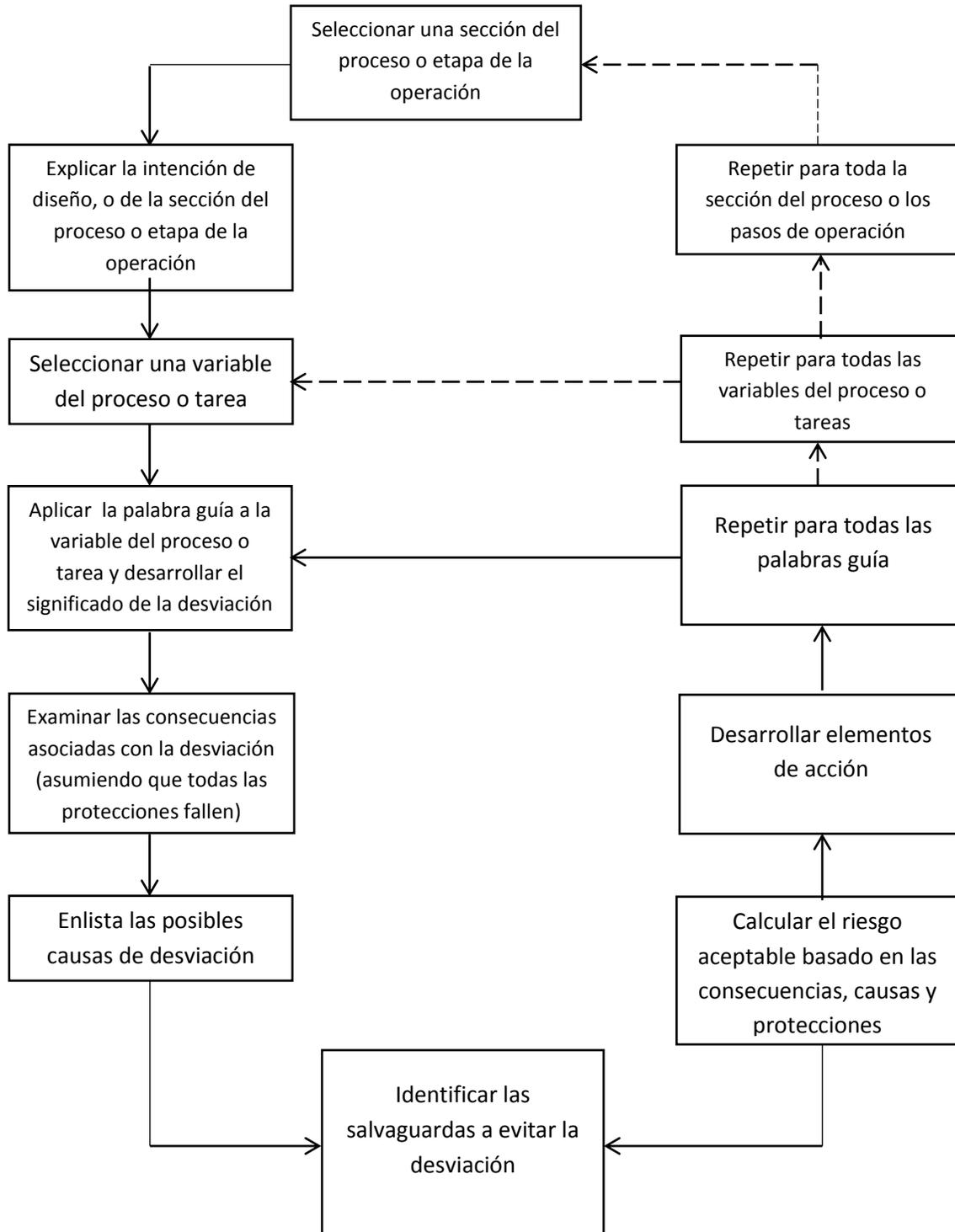
Tabla 2-3. Resumen de clasificación de riesgos

CLASE	RIESGO	DAÑO AL EQUIPO	DAÑO AL PERSONAL
I	seguro	ninguno	ninguno
II	marginal	menor	ninguno
III	crítico	sustancial	daño transitorio
IV	catastrófico	pérdida del tráfico sistema	irreversible o muerte

Fuente: Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 1992.

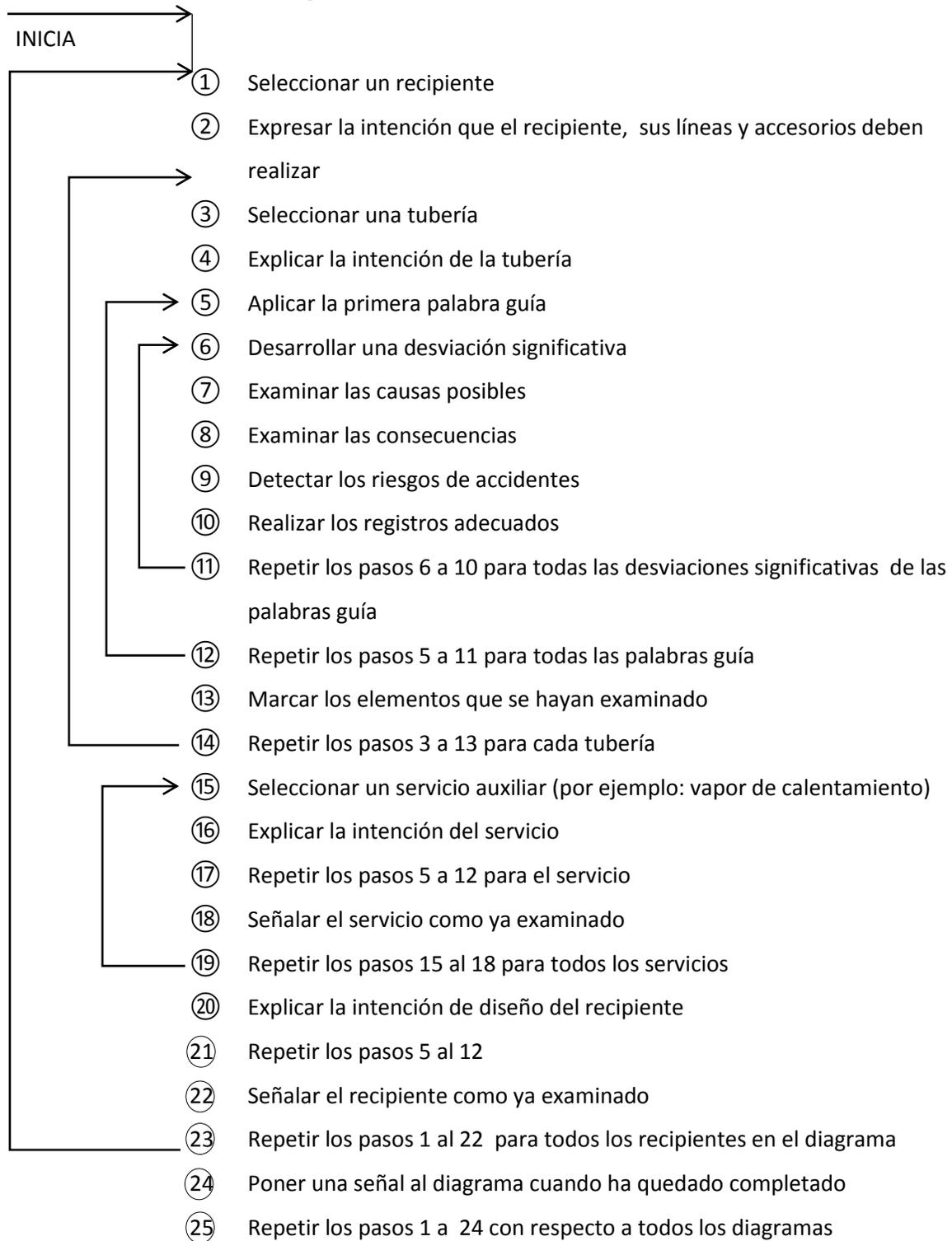
En la Figura 2-1 se muestra el diagrama de flujo para el método de análisis HAZOP. En la figura 2-2 se muestra la secuencia detallada para realizar el HAZOP.

Figura 2-1. Diagrama de flujo para el método de análisis HAZOP.



Fuente: JBF Associates, Inc., Knoxville, TN, 1990.

Figura 2-2. Secuencia detallada del HAZOP



TERMINA Fuente: Hazard and operability Studies: detailed sequence of examination (Chemical Industry Safety and Health Council, 1977/3).

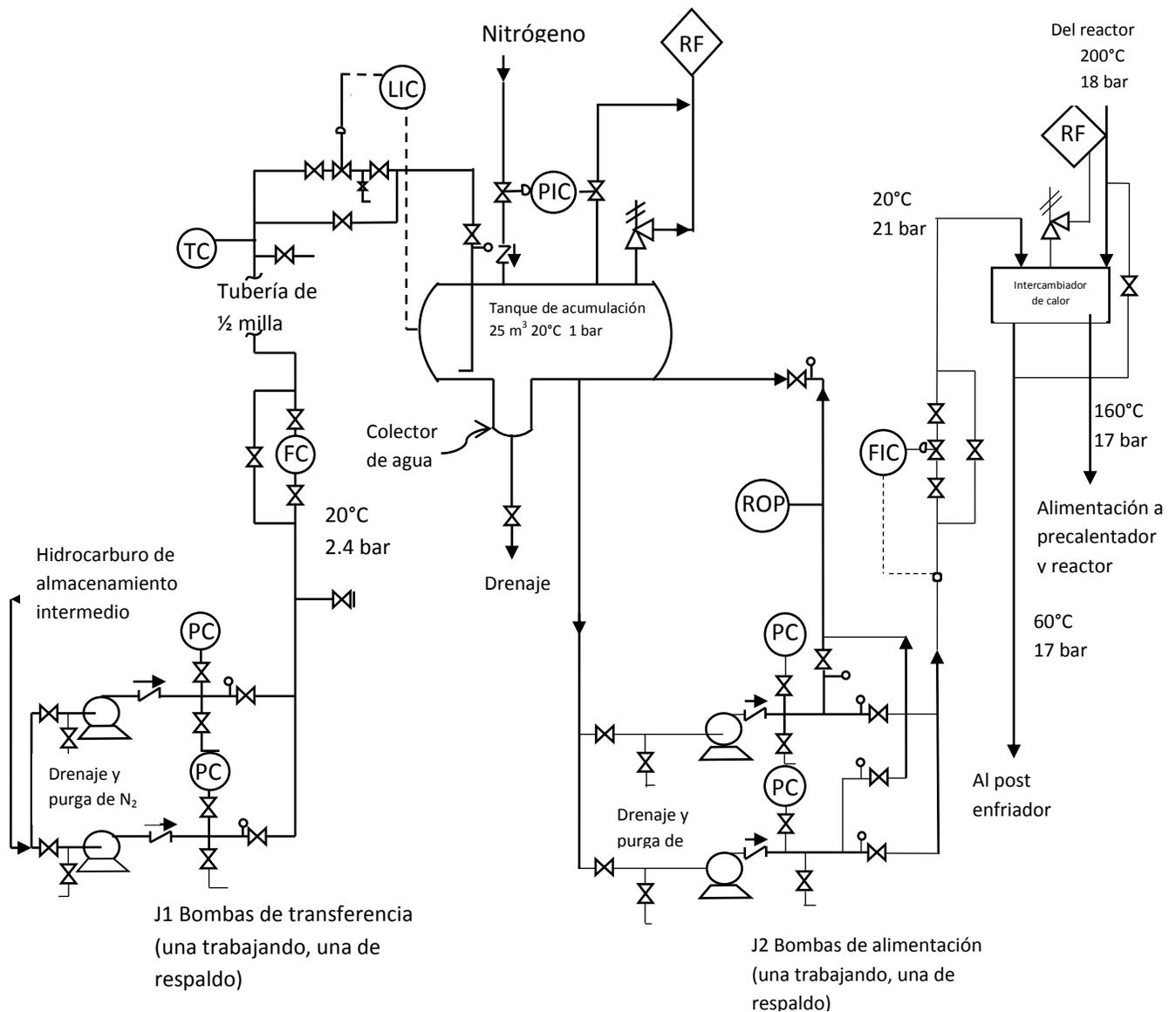
2.2 Aplicaciones

2.2.1 Plantas de proceso continuo

Enseguida se presenta una sinopsis de un ejemplo del uso de la técnica para la identificación de las deficiencias en el diseño para atraer la atención a los requisitos importantes de la operación en el caso de proceso continuo. (Lawley, 1974).

El sistema tenido en cuenta es la sección de carga de una unidad propuesta de dimerización de olefinas. El diseño preliminar es el que se muestra en la figura 2-3 la descripción del proceso es la siguiente:

Figura 2-3. Sección de carga de la planta de dimerización de olefinas



Simbología:

LIC: Controlador indicador de nivel FC: Control de flujo FIC: Control indicador de flujo
Ni: Nitrógeno PC: Control de presión PIC: Control indicador de presión
ROP: Registrador de presión por el usuario RF: Registrador de flujo TC: Control de temperatura

Fuente: Hazard and operability Studies: feed section of proposed alkene dimerization plant (Lawley, 1974b). (Courtesy of the American Institute of Chemical Engineers).

"Una fracción de alqueno/alcano que contiene pequeñas cantidades de agua en suspensión se bombea constantemente desde el tanque de almacenamiento intermedio a un tanque de acumulación/sedimentación a través de una tubería de media milla de longitud. El agua residual se separa antes de pasar, a través de un intercambiador de calor alimentación/producto y un precalentador, a la sección de reacción. El agua, que tiene un efecto perjudicial en la reacción de dimerización, se saca manualmente a intervalos del tanque de sedimentación.

El tiempo de permanencia en la sección de reacción hay que mantenerlo dentro de los límites que sean estrechamente definidos para garantizar la conversión adecuada del alqueno y para evitar la formación excesiva del polímero".

- Alqueno (Olefina): Cualquier serie de compuestos orgánicos que comienzan con el etileno. Los alquenos son hidrocarburos alifáticos no saturados que tienen un doble enlace en la cadena del carbono.
- Alcano (Hidrocarburo parafínico): Cualquier serie de compuestos que conforman la gasolina, el queroseno y la parafina. Los alcanos son hidrocarburos alifáticos saturados.

Es urgente garantizar la clara definición de la intención del diseño antes de comenzar un análisis. En el caso particular que se presenta en este ejemplo. La intención es:

Trasladar una fracción de alqueno/alcano de una composición específica desde el almacenamiento intermedio hasta el tanque de acumulación/sedimentación, a una masa y temperatura especificadas, tal como se muestra en la Tabla 2-4.

**Tabla 2-4. Estudio de operabilidad del proceso de dimerización de olefinas:
Resultados de la sección de tubería desde el almacenamiento intermedio hasta el tanque de acumulación de carga/sedimentación.**

La palabra guía se aplican a la intención del diseño, la cual establece lo que se espera que el equipo haga:

PALABRA GUÍA	DESVIACIÓN	POSIBLES CAUSAS	CONSECUENCIAS	ACCIONES REQUERIDAS
Más	Más presión	Que la válvula de bloque está cerrada por error o que la válvula de control de nivel se cierra con la bomba J1 en funcionamiento.	La tubería de transferencia queda sometida a la presión completa de descarga de la bomba o a las variaciones de presión.	Verificar la tubería, el dimensionamiento del FC o de la brida y reducir, si es necesario, la longitud hasta la válvula de control de nivel. Instalar un PI independientemente en el tanque de sedimentación.
	Más temperatura	Una expansión térmica en una sección entre válvulas cerradas debido a un incendio o al calor térmico del medio ambiente.	Ruptura de la tubería o escape por las bridas.	Instalar una válvula de alivio para expansión térmica en la sección entre válvulas.
	Más temperatura	Por almacenamiento intermedio.	Presión más alta en la tubería de transferencia y en el tanque de sedimentación.	Instalar una alarma por alta temperatura en el tanque de almacenamiento intermedio.

Menos	Menos flujo	Una brida con escape o válvula con escape y sin estar aislada.	Pérdida de material.	Medidores de nivel y alarmas de nivel. Pruebas radiográficas de soldadura.
	Menos temperatura	Condiciones de invierno.	Drenaje del agua y de la tubería de drenaje completamente congelados.	Calentar con vapor las válvulas y líneas de drenaje.
También, así como	Ácidos orgánicos presentes	Desviaciones en las columnas de destilación antes del tanque de almacenamiento intermedio.	Aumento en la de corrosión de la base del tanque del sumidero y de la tubería de drenaje.	Verificar adecuación de los materiales de construcción.
Parte de	Alta concentración de agua en el flujo	Alto nivel del agua en los tanques de almacenamiento intermedio.	El drenaje de agua se llena más rápidamente. Posibilidad de aumento en el paso de la fase del agua hacia la sección de reacción.	Disponer drenaje frecuente del agua del tanque de almacenamiento intermedio, instalar alarma de alto nivel interface en el drenaje.

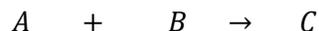
	Alta concentración de alcanos bajos o de alquenos en el flujo	Desviaciones en las columnas de destilación antes de los tanques de almacenamiento intermedio.	Presión más alta del sistema.	Verificar que el diseño del tanque de sedimentación de la tubería asociada, incluyendo el dimensionamiento de la válvula de seguridad, darán abasto para el ingreso repentino de más hidrocarburos volátiles.
Además	Ningún mantenimiento	Fallas en los equipos e instrumentación, etc.	La tubería no se puede drenar o purgar completamente.	Instalar drenaje en un punto bajo con Nitrógeno corriente debajo de la válvula de control de nivel. También venteo de Nitrógeno en el tanque de sedimentación.

No se evidenció ningún riesgo por consideración de reversión del flujo o por menos presión en la tubería.

Fuente: Hazard and operability Studies: feed section of proposed alkene dimerization plant (Lawley, 1974b). (Courtesy of the American Institute of Chemical Engineers).

2.2.2 Plantas de proceso intermitente (Batch)

Con el propósito de ilustrar los principios de procedimientos considérense una planta en la cual los compuestos "A" y "B" van a reaccionar para formar el producto "C"; es decir:



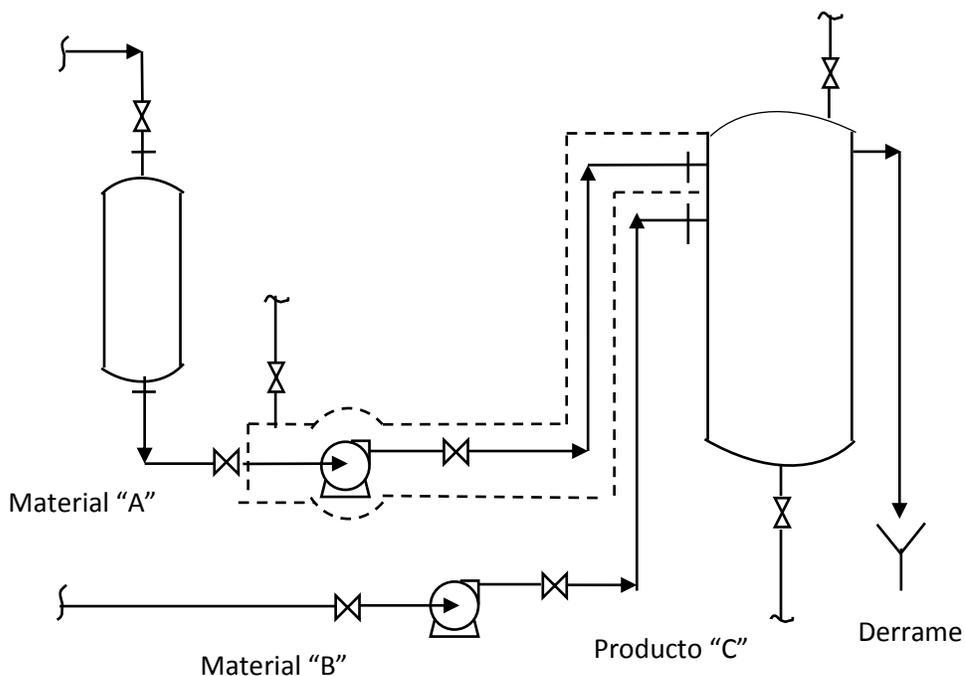
Supóngase que la química del proceso es tal que la concentración del material "B" no debe ser mayor, nunca, a la de "A" de otra forma puede ocurrir una explosión.

Con referencia a la Figura 2-4, se pueda empezar con la primera parte, es decir, la tubería que se extiende de la sección de la banda que alimenta el material "A", hasta su entrada al reactor.

Figura 2-4. Ejemplo de reacción: $A + B \rightarrow C$

El componente "B" no debe exceder al componente "A" para evitar una explosión.

La parte del diagrama que se examina se ha marcado como la línea en guiones: - - - - -



Fuente: ILO/UNEP/WHO International Programmed on Chemical Safety, 1988.

El propósito es descrito parcialmente por el diagrama de flujo y parcialmente por las necesidades de controlar la transferencia de "A" a una velocidad específica. La primera desviación se obtiene aplicando la palabra guía NO a la intención. Es la palabra se combina con la intención para dar:

NO TRANSFERIR "A"

Acto seguido se examina el diagrama de flujo para establecer las CAUSAS que pueden producir la interrupción completa del flujo de "A". Las causas pueden ser:

- El tanque de alimentación está vacío.
- Falla de la banda por:
 - falla mecánica.
 - falla eléctrica.
- Se apaga la bomba.
- Se rompe la tubería.
- Se cierra la válvula de alimentación, etc.

Se ve claramente que algunas de estas causas son relevantes y se pueden decir que son desviaciones significativas.

Después se pueden considerar como consecuencia:

La interrupción completa del flujo de "A" provocaría muy pronto un exceso de "B" sobre "A" en el reactor y en consecuencia se presenta el peligro de explosión. En consecuencia se ha descubierto un RIESGO en el diseño y es señalado para corregir el diseño.

CAPÍTULO 3

EL PROCESO DE

ALQUILACIÓN

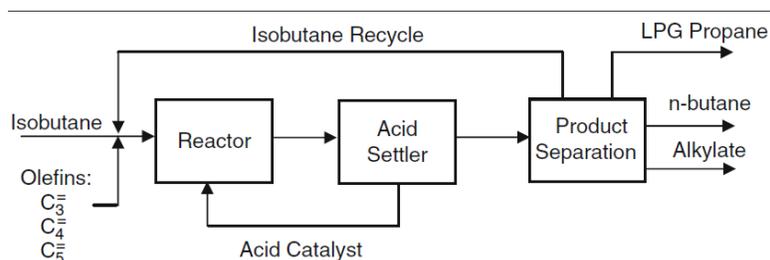
CAPÍTULO 3. El proceso de alquilación

La alquilación es el proceso de producción un rango de material de gasolina (alquilados) a partir de olefinas tales como propileno (C_3^-), butilenos (C_4^-) y amileno (C_5^-) e isobutano. El butileno es la olefina más ampliamente utilizada debido a la alta calidad del alquilado producido. La tendencia actual hacia la eliminación del éter metílico de terc-butilo (MTBE) ha dado lugar a una mayor atención a la tecnología de alquilación.

La alquilación se cataliza mediante un ácido fuerte, ya sea sulfúrico (H_2SO_4) o fluorhídrico (HF). En ausencia de catalizadores, la alquilación entre isobutano y olefina debe realizarse bajo condiciones severas tales como $T=500\text{ }^\circ\text{C}$ ($932\text{ }^\circ\text{F}$) y $P = 200 - 400$ bares ($2940 - 7080$ psia). En presencia de un ácido catalizador, la temperatura de reacción será inferior a $50\text{ }^\circ\text{C}$ ($122\text{ }^\circ\text{F}$), y la presión será inferior a 30 bares (441 psia). La principal diferencia en el uso de cualquiera de los ácidos es que el isobutano es bastante insoluble en H_2SO_4 pero razonablemente soluble en HF. Esto requiere el uso de elevadas relaciones isobutano / olefina para compensar la baja solubilidad en H_2SO_4 . Además, la reacción debe producirse a baja temperatura.

El proceso de alquilación consiste en el funcionamiento de los hidrocarburos en forma líquida (se utiliza suficiente presión para asegurar que) ya baja temperatura y con una elevada proporción de isobutano (iC_4) a olefina (tal como C_4^-). Los productos de reacción se envían a un decantador ácido donde el ácido se recicla al reactor. Productos se separan a continuación en propano gaseoso de LPG y n-butano y el producto deseado de alquilado. En la figura 3-1 se muestra un diagrama de bloques del proceso.

Figura 3-1. Diagrama de bloque del proceso de alquilación.



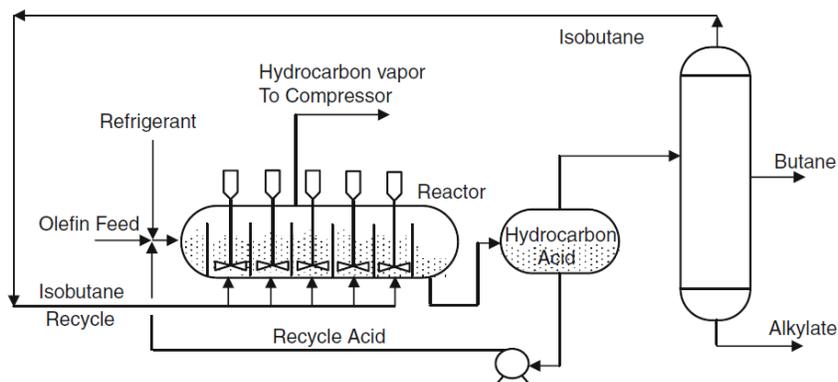
Fuente: M. A. Fahim; Taher A Alsahhaf & Amal Sayed Elkilani, 2010.

Dos procesos de alquilación de ácido sulfúrico están comúnmente disponibles. Estos son el proceso de auto-refrigeración licenciado por Exxon y el proceso de refrigeración de efluentes licenciado por Stratford. La diferencia principal entre los dos procesos es en el diseño del reactor. En el proceso de auto-refrigeración, la evaporación de iC_4 y C_4^- induce el enfriamiento de la emulsión en el reactor. En el proceso de refrigeración del efluente, una unidad de refrigeración proporciona enfriamiento al reactor.

La unidad de auto-refrigeración se muestra en la Figura 3-2. La olefina se alimenta al primer reactor en las cascadas, junto con el ácido reciclado y el refrigerante. Los isobutanos reciclados y de maquillaje se distribuyen a cada reactor. Los gases evaporados se comprimen y se devuelven al reactor junto con la alimentación de olefina fresca que también se enfría mediante esta corriente (Gary y Handwerk, 1994).

El reactor funciona a una presión de 90 kPa (10 psig) y a una temperatura de 5 °C (40 °F) durante un máximo de 40 min. En el procedimiento de Stratco, el reactor se hace funcionar a una presión más alta de 420 kPa (60 psig), para evitar la evaporación del hidrocarburo, y a una temperatura de 10 °C (50 °F).

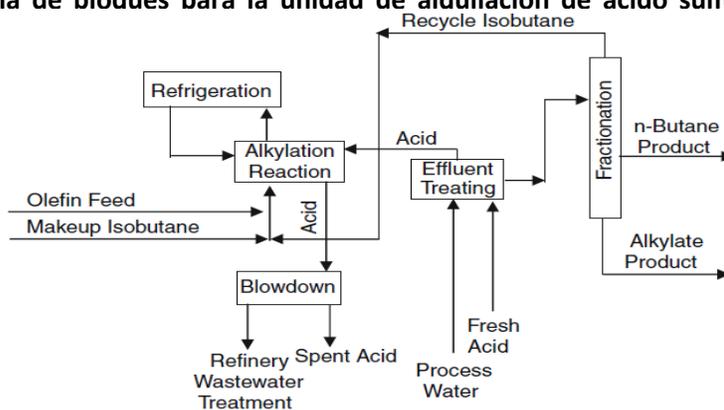
Figura 3-2. Diagrama del proceso de alquilación de ácido sulfúrico auto-refrigerado.



Fuente: Gary & Handwerk, 1994.

En la Figura 3-3 se muestra un diagrama de bloques del proceso refrigerado de efluentes de Stratco. En este diagrama se utiliza la sección de tratamiento de efluentes para eliminar el ácido libre y el sulfato de alquilo para evitar la corrosión y el ensuciamiento. La sección "purga" se usa para purgar y neutralizar el ácido agotado.

Figura 3-3. Diagrama de bloques para la unidad de alquilación de ácido sulfúrico refrigerado efluente de Stratco.

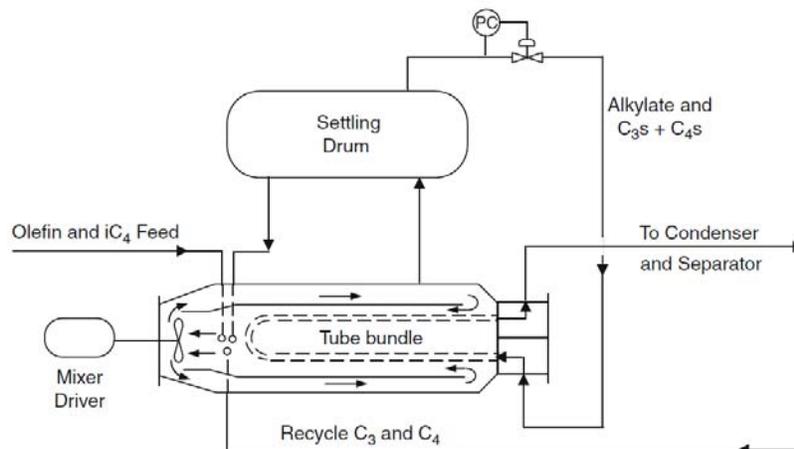


Fuente: Gary & Handwerk, 1994.

El proceso de refrigeración del efluente utiliza un solo diseño de reactor Stratco, que se muestra en la Figura 3-4. Un impulsor emulsiona la mezcla de hidrocarburo-ácido durante aproximadamente 20-35 min. La emulsión eliminada del reactor se envía a un sedimentador para separar las fases. Se recircula el ácido y se disminuye la presión de la fase hidrocarburo para vaporizar por destilación súbita una parte de la corriente y reducir la temperatura del líquido hasta unos $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. El líquido frío se emplea como refrigerador en el haz de tubos del reactor. Los gases desprendidos se comprimen y licuan, y entonces se envían al depropanizador, donde se separan el propano grado GLP y el isobutano de recirculación.

El hidrocarburo líquido procedente del haz de tubos del reactor se separa en isobutano, n-butano y alquilado, en una columna desisobutanizadora. El isobutano se recircula, siendo los productos el n-butano y el alquilado.

Figura 3-4. Reactor de Stratco



Fuente: Gary & Handwerk, 1994.

El método empleado para eliminar los sulfatos consiste en que los hidrocarburos líquidos se lavan primero con ácido y luego se pone en contacto con un lecho de polvo de bauxita. La bauxita se adsorbe eficazmente ácido residual, sulfatos y agua. Un alimento seco minimiza la corrosión. Después de que los sulfatos son retirados de los líquidos de hidrocarburos, la mezcla resultante se alimenta a la desisobutanizadora. En las plantas más grandes, la desisobutanizadora es generalmente una columna de destilación (y por lo tanto tiene un condensador de reflujo).

Esta aparente ventaja de un reactor en cascada en comparación con una refrigeración del efluente tiende a ser negado por el hecho de que la alimentación de olefina no se mezcla previamente con isobutano. Las alimentaciones de olefinas tienden a ponerse en contacto con la fase ácida por primera vez cuando las emulsiones son ácido-continuas en los puntos de inyección. En consecuencia, a menudo se producen reacciones no deseadas que resultan en la formación de polímero más reacciones de polimerización en conjunción.

Las siguientes conclusiones se aplican a un reactor en cascada:

- La calidad de alquilado más alta se produce en la etapa 1 y los más pobres en la etapa 5, debido a la diferencia en las proporciones de isobutano a olefina en las etapas.
- Hay más hidrocarburos solubles en ácido que se producen en etapas posteriores del reactor.
- El alquilado producido en las etapas iniciales se degrada a por lo menos una pequeña medida, en las etapas finales del reactor.
- Los sulfatos de sec-butilo e isopropilo producidas en la última etapa de un reactor de cascada reaccionan en una medida ligeramente menor en comparación con los sulfatos similares producidos en un efluente de refrigeración. Esta conclusión se basa en el tiempo de residencia más corto en la última etapa, en comparación con la de un efluente de refrigeración.

El aumento de la producción de alquilado se puede compensar en mayor parte, a la necesidad de reducir los niveles de aromáticos y disminuir el contenido de olefinas en la gasolina. Estos se han convertido en temas clave en la planificación de las refinerías desde la implementación de las modificaciones de la Ley de Aire Limpio de 1990. (Masters & Unzelman, 1991)

El alquilado permite que los motores de combustión interna tener mayores relaciones de compresión y aumenten su potencial de millas por galón, puesto que, el alquilado arde libremente para promover la vida útil del motor, y tener los más bajos niveles de emisión. La baja presión de vapor del alquilado ayuda a las refinerías a mantener las especificaciones de volatilidad.

En la tabla 3-1 se muestran las características del octano y la presión de vapor de los principales reactivos y productos del alquilado. Esto demuestra que, aunque el octano en la alimentación de alquilación tenga una presión de vapor excesiva, es adecuada para la producción de gasolina. (Chapin, Liolios & Robertson, 1985).

La alquilación con ácido sulfúrico es un proceso altamente complementario para las refinerías que están considerando la producción de (MTBE) en el lugar. (Chapin, Liolios & Robertson, 1985). El proceso de MTBE reacciona selectivamente el isobutileno de la corriente de las olefinas, permitiendo pasar a través del 1-butileno al 2-butileno para la alquilación. El isobutileno produce un alquilado de calidad inferior, mientras que el 1-butileno y 2-butileno produce un alquilado superior.

Tabla 3-1. Características del octano y presión de vapor de los principales reactivos y productos del alquilado.

Reactivos	Octano		Presión de vapor a 100°F
	Motor	Investigación	psia
Isobutano	97.6	100.1	72.6
Propileno	84.9	100.2	227.6
Isobutileno	n/a	n/a	64.6
2-Butileno	83.5*	100.0*	47.8*
1-butileno	80.8	97.4	63.2
2-Metil-butileno	83*	99*	16.4*
Productos (lista parcial)			20.4
Isopentano	90.3	92.3	3*
Dimetilpentano	88*	>100	
Trimetilpentano	98*	>100	1*
C ₉ 's	98*	100*	>0.5

* Valores promedios

Fuente: (API, 1987)

3.1 Comparación del ácido fluorhídrico (HF) y el ácido sulfúrico (H₂SO₄) en el proceso de alquilación

Las ventajas relativas del ácido fluorhídrico (HF) en contra del H₂SO₄ para la alquilación, se han debatido enérgicamente en la literatura y en el mercado por años. (Meyer, Chapin & Muir, 1983). Las ventajas del HF incluyen: un producto superior cuando el contenido de olefina es alta en propileno e isobutileno y la reducción del costo del catalizador. También, la alquilación de HF no requiere refrigeración o ácido de regeneración por lo que es marginalmente mejor a este respecto.

Recientemente, las preferencias se han desplazado hacia la alquilación con H₂SO₄; esto se debe en parte a la alta naturaleza corrosiva del HF, lo que requiere materiales más costosos en la construcción de la planta. El proceso también es mucho más peligroso; debido a que el HF no es aceptable fácilmente para el medio ambiente. Las consideraciones de seguridad y responsabilidad, junto con una reducción en el contenido de isobutileno en la alimentación de olefina (debido a la planta MTBE), son factores adicionales. Además, el desarrollo más reciente del "procedimiento húmedo del ácido sulfúrico" aminora más de las desventajas anteriormente efectuados por alquilación con el H₂SO₄.

3.1.1 Variables en el proceso de alquilación

Los cambios en estas variables afectan al rendimiento y a la calidad del producto.

- Tipo de olefina

La presencia de propileno o penteno con butano disminuirá el índice de octano y aumentará el consumo de ácido. El índice de octano de los alquilados producidos a partir de olefinas ligeras se da en la Tabla 4-2. El buteno en ácido sulfúrico como catalizador da los mejores números de octano como se muestra en la Tabla 3-2. La presencia de propileno con buteno aumenta el consumo de ácido y disminuye el número de octano de alquilado. En el caso de una mezcla de alimentación C_3^-/iC_5^- , la tendencia es interesante ya que el consumo de ácido sulfúrico disminuye hasta un 82% en volumen de la mezcla C_3^-/iC_5^- . Sin embargo, el número de octano también disminuye. Esto podría sugerir que a menor consumo de ácido, es mejor separar la mezcla C_3^-/iC_5^- de C_4^- y dejar que reaccione con iC_4 en un reactor separado.

Tabla 3-2. Efecto del tipo de olefina en el número de octano de alquilado.

Tipos de Olefina	RON		MON	
	HF	H ₂ SO ₄	HF	H ₂ SO ₄
Propileno	91 – 93	91 – 92	89 – 91	90 – 92
1- Buteno	90 – 91	97 – 98	88 – 89	93 – 94
2- Buteno	96 – 97	97 – 98	92 – 93	93 – 94
Isobuteno	94 – 95	90 – 91	91 – 92	88 – 89
Amileno	90 – 92	91 – 92	88 – 89	89 – 91

Fuente: Kranz & Graves, 1998.

- La fuerza del ácido

Se mantiene un valor óptimo de la fuerza ácida del 90% en peso de H₂SO₄ añadiendo ácido concentrado fresco (98-99% en peso). El ácido gastado es purgado fuera del sistema y usualmente regenerado fuera de la refinería. A medida que la fuerza del ácido disminuye, el consumo de ácido aumenta con el número de octano disminuye. La concentración mínima de ácido requerida para operar el sistema no debe ser inferior al 85% en peso. A menor resistencia, la polimerización ocurre y prevalece una condición de "fugitivo". Para proporcionar un margen de seguridad suficiente, la resistencia ácida se mantiene alrededor del 90% en peso. Aunque el agua disminuye la actividad ácida, se añade 1-2% en peso de agua para ionizar el ácido. La concentración de ácido disminuye debido a la formación de gomas y otros productos resultantes de la reacción con otras impurezas. De este modo, se debe añadir un ácido maquillado.

- Grado de agitación

Cuando los hidrocarburos (iC_4 y C_4^-) se dispersan en ácido sulfúrico, la velocidad del impulsor determina el tamaño de la fase dispersada (diámetro de la gotita) y, por lo tanto, el área de contacto interfacial. La velocidad de reacción de iC_4 y C_4^- es bastante rápida, y la reacción se controla mediante transferencia de masa. Las reacciones secundarias causan la formación de alquilados pesados según la siguiente ecuación (Rase, 1977):

$$\frac{R_{iC_8}}{R_{heavy\ alkylate}} = \frac{(Const)[iC_4]_h N^{0.75} (1 - H_a)}{(SV)_0}$$

Donde $[iC_4]_h$ es la concentración de iC_4 en la fase de hidrocarburo, N es la velocidad del impulsor (rpm), H_a es la retención de ácido fraccional, $(SV)_0$ es la velocidad de la olefina espacial (1 / h) La velocidad de formación del alquilado pesado indeseable, y R_{iC_8} es la velocidad de formación del alquilado encontrado en el iC_8 .

Esta ecuación muestra que la calidad del alquilado producido puede mejorarse aumentando la velocidad del impulsor y la concentración de iC_4 . La relación de velocidad en el lado izquierdo de la ecuación puede maximizarse usando un bajo retención de ácido y una velocidad espacial de baja olefina $(SV)_0$.

Dado que la solubilidad de iC_4 en el ácido sulfúrico es menor que la de C_4^- , la reacción se controla por la velocidad de transferencia de masa y la velocidad de disolución del iC_4 en el ácido.

- Temperatura de reacción

La termodinámica y la cinética de reacción se favorecen a bajas temperaturas, como se ha mostrado antes. Las unidades de alquilación de ácido sulfúrico se hacen funcionar a 5-10 °C (40-50 °F). Por encima de 10 °C, se promueven la oxidación y las reacciones secundarias, y el deterioro del rendimiento y calidad del alquilado mientras aumenta el consumo de ácido. Es imposible hacer funcionar la reacción por debajo de 0 °C (32 °F) porque la viscosidad del ácido será demasiado alta y la agitación se hace difícil. Por encima de 21 °C (70 °F), se producirá la polimerización de olefina y disminuirá el número de octanos de alquilado. Para la alquilación con HF, la temperatura de reacción es menos significativa y está entre 21 y 38 °C (70 y 100 °F).

- La concentración de isobutano

La concentración de isobutano se expresa generalmente por la relación isobutano/olefina. Las altas relaciones del isobutano/olefina aumentan el número de octano y el rendimiento, y reducen las reacciones laterales y el consumo de ácido. En la práctica industrial la relación isobutano/olefina de la carga del reactor es entre 5:1 y 15:1 molar.

Los reactores que disponen de recirculación interna para aumentarla la relación de alimentación al reactor, emplean relaciones internas desde 100:1 hasta 1000:1. Las plantas de alquilación que emplean H₂SO₄ como catalizador, a menudo operan la relación isobutano/olefina en el rango de 5:1 a 8:1 molar. Las plantas que emplean HF generalmente funcionan a relaciones más altas, tales como 10: 1 a 15: 1 molar.

- Tiempo de residencia

Los alquilados ligeramente de mayor calidad y el consumo inferior del ácido, normalmente se producen si se aumenta el tiempo de residencia de la suspensión de hidrocarburo-ácido en el reactor, es decir, las velocidades espaciales están disminuyendo. Sin embargo, los tiempos de residencia que son más largos, reducen la capacidad de un reactor y aumentan los gastos operativos.

- Velocidad espacial

La velocidad espacial de la olefina se define como:

$$(SV)_o = \frac{\text{Flujo volumétrico de las olefinas (bbl/h)}}{\text{Volumen del ácido en el reactor (bbl)}}$$

El tiempo de residencia en el reactor es (1 / (SV)_o) y se define como el tiempo de residencia de la alimentación fresca y el isobutano reciclado externamente en la mezcla de reacción. Puesto que la reacción de alquilación es muy rápida, el tiempo de residencia no es un parámetro limitante.

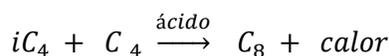
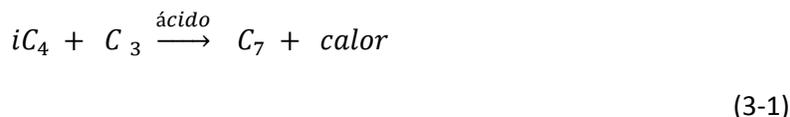
Sin embargo, a medida que aumenta la velocidad espacial, el índice de octano tiende a disminuir mientras que el consumo de ácido tiende a aumentar. El tiempo de residencia para el ácido sulfúrico suele ser de 5 a 40 min, y para el ácido fluorhídrico, es 5-25 min.

- Aditivos

Los resultados de la planta muestran que varios aditivos a resultado con el H₂SO₄ en las tasas de producción mejoradas, hacen una mejor calidad del alquilado, y / o disminución de consumo del ácido. Estos aditivos, que presumiblemente se acumulan en la interfaz de ácido-hidrocarburo, resultan en transferencia de iones hidruro mejorados y en una mejora de tensiones superficiales interfaciales. (M. A. Fahim; Taher A Alsahhaf & Amal Sayed Elkilani, 2010).

3.2 Reacción química

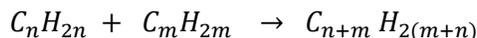
El principal propósito del reactor de alquilación es de unir un isobutano y una olefina ligera para formar alquilados ramificados. (Lee & Harriott, 1977).



Las reacciones desproporcionadas contribuyen a la distribución de los productos alquilados del iC_5 al C_{12}^+ ; por ejemplo:



La polimerización de olefinas es indeseable y por lo general se reduce al mínimo por una mezcla adecuada, con temperaturas de reacción bajas y altas concentraciones de isobutano.



Los polímeros forman los aceites solubles ácidos que le faltan al catalizador del ácido sulfúrico, que resulta en exceso los requisitos de purga y recuperación. A medida que la concentración del ácido se debilita, se puede producir un "ácido fuera de control", que se caracteriza por su bajo octanaje y un mayor consumo de ácido, puede ocurrir.

3.3 Modelación del reactor

En el proceso de cascada o auto-refrigeración, se divide el reactor en cuatro cámaras de reacción, haciendo que el flasheo se produzca en cada cámara para equilibrar el calor exotérmico de la reacción. También se considera que la refrigeración del efluente y la reacción toman lugar en una cámara para suprimir el vapor.

La reacción se mantendrá a 45 °F, para que las fases de los hidrocarburos y del ácido líquido coexistan en el reactor; ya que las temperaturas significativamente por encima de los 45 °F son resultado del consumo excesivo ácido y un menor índice de octano. Las temperaturas significativamente por debajo de 45 °F aumentan la carga de refrigeración.

3.4 Cinética y termodinámica de la alquilación.

La alquilación se lleva a cabo en el líquido, la fase gaseosa o en un sistema mixto de gas-líquido. Considerando una simple reacción en fase líquido de isobuteno (A) e isobutano (B) forman iso-octano (A_1).



Si γ se considera el gradiente de concentración m_{A_0} y m_{B_0} son el número de moles de A y B en la mezcla inicial, respectivamente, y $\delta = m_{B_0}/m_{A_0}$. El número de moles en el sistema de reacción puede ser expresado como

$$(m_{A_0} - m_{A_0}\gamma) + (m_{B_0} - m_{A_0}\gamma) + m_{A_0}\gamma = m_{A_0} (1 + \delta - \gamma) \quad (3.5)$$

Acomodando, las fracciones mol pueden ser expresadas como:

$$x_A = \frac{1-\gamma}{1+\delta-\gamma}, x_B = \frac{\delta-\gamma}{1+\delta-\gamma} \text{ and } x_{A_1} = \frac{\gamma}{1+\delta-\gamma} \quad (3.6)$$

Entonces, la constante de equilibrio de reacción se puede expresar como:

$$K_{x_{eq}} = \frac{x_{A_1}}{(x_A)(x_B)} = \frac{\gamma(1+\delta-\gamma)}{(1-\gamma)(\delta-\gamma)} \quad (3.7)$$

Y el grado de conversión, γ , puede ser calculado como.

$$\gamma = \frac{(\delta+1) - \sqrt{(\delta+1)^2 - \frac{4K_{x_{eq}}\delta}{K_{x_{eq}}+1}}}{2} \quad (3.8)$$

Asumiendo una solución ideal y aplicando la ley de Raoult, la constante de equilibrio en la fase gaseosa puede ser expresada:

$$K_p = K_{x_{eq}} K_p^\circ \quad (3.9)$$

Donde K_p y $K_{x_{eq}}$ son las constantes de equilibrio de la reacción en las fases líquida y gaseosa, respectivamente, y K_p° es la constante estándar de equilibrio del gas que puede ser calculada usando la presión de vapor saturado de los componentes a la temperatura de la reacción. K_p° puede ser calculado de la siguiente ecuación:

$$K_p^\circ = \frac{P_{A_1}^\circ}{P_A^\circ P_B^\circ} \quad (3.10)$$

3.5 Condiciones de operación

Las condiciones del proceso que influyen en la calidad del producto alquilado y la tasa de consumo de ácido son el tipo de olefina, la relación de dilución de (iC_4/iC_4^-), la temperatura de mezcla, la velocidad del impulsor, la velocidad espacial (o tiempo de residencia) y la acidez.

Las condiciones de operación para el proceso de alquilación, se muestran en la Tabla 3-3. Condiciones de alimentación de hidrocarburos y en la tabla 3-4. Alimentación ácida para el reactor. Estas condiciones y alimentación son empleadas en la simulación de la planta de alquilación obteniendo un total de 12,000 barriles/día.

Tabla 3-3. Condiciones de alimentación de hidrocarburos

Corriente inicial	Flujos de los componentes, nivel liq. Vol., barriles/h		
	Alimentación saturada 1	Alimentación de Olefinas 2	Suplemento de Isobutano 3
Metano	2.0	-	-
Etano	10.1	-	-
Propano	100.0	9.0	-
Isobutano	187.5	95.0	36.0
Butano	100.0	50.0	9.0
Propeno	-	9.0	-
Isobuteno	-	14.0	-
2-buteno	-	75.0	-
1-buteno	-	56.0	-
Isopentano	-	5.0	-
Total	399.5	413.0	45.0
Temperatura, °F	100	100	100
Presión, psia	400	215	400
Densidad lb/ft ³	32.593	35.24	33.98

Fuente: SimSci-Esscor (2013). PRO II 9.2. Sulfuric Acid Alkylation Casebook.

Tabla 3-4. Alimentación ácida para el reactor

Propiedad	Valor de la propiedad en la corriente
La corriente de alimentación se identifica como:	SA1
Flujo del ácido, 10 ⁶ lb/h	1.00
Temperatura °F	45
Presión, psia	40
Densidad de Vapor (Aire=1) lb/ft ³	3.3238

Fuente: SimSci-Esscor (2013). PRO II 9.2. Sulfuric Acid Alkylation Casebook.

3.6 Simulación de la planta de alquilación de olefinas con ácido sulfúrico en el programa PRO II

La simulación de la planta de alquilación con el programa PRO II me ayudara a realizar la ingeniería básica y desarrollar en el diagrama del flujo de proceso (Figura 4-6), donde se definirá la distribución de la tubería y de los equipos, los diseños y especificaciones generales, balances de materia y energía, y definir los requerimientos de servicios y construcción o fabricación.

Para dar pasó a realizar el diagrama de tubería e instrumentación (DTI's) y hacer el análisis de riesgo HAZOP.

Se usan las unidades inglesas, con barriles de unidades de volumen de líquido y la gravedad específica para densidad estándar.

La formulación alfa especial predice la capacidad de calor del ácido y la interacción con la ecuación de estado de Soave Redlich-Kwong (SRK) con los parámetros, predicen la solubilidad mutua del H_2SO_4 con los hidrocarburos. Además, como el módulo del reactor el simulador Pro II no soporta la configuración rigurosa, los productos de cada reacción deben ser en una cámara flash adiabático para calcular las condiciones de salida. (Soave, 1992).

También la simulación hace las siguientes simplificaciones:

- El pre-tratamiento de la alimentación no está incluido. Cuando las torres de amina están funcionando correctamente, su funcionamiento no tiene efecto en el diagrama de flujo.
- El tratamiento cáustico no se considera. Los productos de los reactores funcionan generalmente a través de un lavado cáustico para neutralizar el arrastre de ácido y la formación del éster.
- Cuando el sedimentador de ácido está funcionando correctamente, el lavado cáustico tiene poco efecto sobre el balance de calor o de hidrocarburos, por lo que se puede eliminar con seguridad de la simulación.
- La estequiometria es fija para cada par de reacción de isobutano-olefina, y cada una olefina reacciona a la extinción.
- El ácido sulfúrico se supone que es 100% puro y totalmente inmiscible en el proceso del hidrocarburo. En realidad, la circulación del ácido sulfúrico se mantiene generalmente a del 85 al 96 por ciento en peso.
- La cantidad de trazas de hidrocarburos absorbidos por el ácido se eliminan por la purga del ácido y por lo general puede ser ignorada en el balance de hidrocarburos. El ácido es arrastrado o se absorbe en el efluente de hidrocarburos del reactor, se neutraliza por lavado cáustico, y normalmente no tienen un efecto significativo en el equilibrio de hidrocarburos. El único efecto de tener una circulación de ácido sulfúrico es para tener en cuenta correctamente para la capacidad de calor que fluye.

Suponemos para esta simulación que existe agua de enfriamiento para enfriar las corrientes del proceso hasta un mínimo de 100 °F. Las estimaciones de las corrientes de recirculación son proporcionadas para mejorar el tiempo en la unidad de procesamiento principal del simulador.

El diagrama de flujo se divide en dos controladores y dos lazos de reciclaje. El control del lazo interior fija la temperatura de salida del separador a 45 °F. El lazo de reciclado interno resuelve el circuito de separación del producto del efluente del reactor. El lazo exterior incluye la parte posterior reciclado al depropanizador.

Se toma en cuenta que en el reactor se resuelve en cada paso a través de cada lazo, que es la razón por que el tiempo de la unidad de procesamiento principal del simulador se ve afectado rigurosamente por tres flashes de fase si se llevan a cabo para la simulación del reactor.

El economizador (CH-020) es operado de una manera que fija la temperatura de salida de ambos lados del intercambiador. Normalmente, sólo hay suficientes grados de libertad para especificar una temperatura de salida de un intercambiador de calor; sin embargo, la presión de entrada en el lado de saturados es variada por el controlador (C1) hasta que se cumplan las dos especificaciones de temperatura. Este lazo es controlado está grabado en otro lazo de control, así como un lazo de reciclado.

Por lo tanto, es esencial que la tolerancia se apriete, lo que permite a los lazos externos para ver derivaciones limpias. Dado que este lazo es el más interior, una buena práctica es fijar esta tolerancia apenas lo suficientemente suelta para asegurar la convergencia en cada pasada. Una tolerancia absoluta de 0.0001 °F se utiliza en esta demostración.

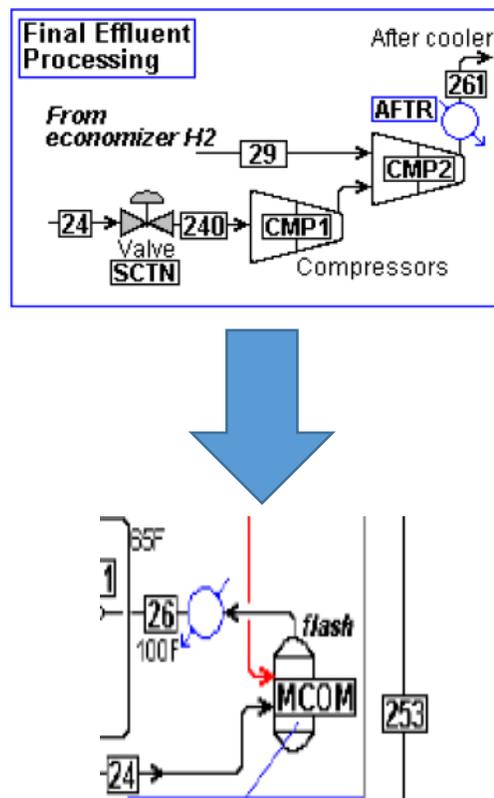
La temperatura de efluente del reactor (TR-021) se controla a 45° F mediante el ajuste de un tanque separador (splitter). Esto tiene el efecto de hacer circular más o menos refrigerante a través del circuito de auto-refrigeración y por lo tanto el enfriamiento del reactor a una mayor o menor medida.

El número de iteraciones de control se limita a 5, ya que no es necesario resolver este reciclaje hasta su finalización en cada pasada de reciclaje. Esto permite que el lazo de reciclado y de control pueda converger simultáneamente, reduciendo el tiempo de la unidad de procesamiento principal del simulador, utilizando una tolerancia absoluta de 0.0002 °F.

El procesamiento de efluentes incluye la compresión en dos etapas seguido de un condensador (after-cooler). Para acelerar los cálculos de reciclaje, todas estas operaciones unitarias son reemplazadas por una sola unidad flash (TV-024). Tras el éxito de la convergencia de todos los lazos de recirculación, los cálculos detallados de los efluentes se realizan una vez por la solución de dos compresores y un intercambiador de calor como se muestra en la Figura 3-5.

Aunque los compresores no requieren cantidades excesivas de la unidad de procesamiento principal del simulador, el número de pasadas a través de este lazo lo hacen valer la pena para reducir las dos constantes de: presión - entropía (P-S) y presión - temperatura (P-T) en la unidad de flash (TV-0015) que solo la unidad del intercambiador de calor que solo reduce la constante P-T.

Figura 3-5. Modelo de procesamiento de efluentes detallado



Fuente: SimSci-Esscor (2013). PRO II 9.2. Sulfuric Acid Alkyltion Casebook.

Por años una planta de alquilación con ácido sulfúrico ha operado con poca consideración para renovación o modernización. Esta demostración toma una nueva mirada a cómo se utiliza mejor esta planta en la era de reformulación, con baja volatilidad en la presión de vapor (RVP) y tener una gasolina con números bajos en aromáticos.

Una posibilidad para la renovación es cambiar la desisobutanizadora convencional por una operación con iso-stripper. Esto tiende a aumentar la velocidad reciclado que, a su vez, se traduce en un contenido más alto de isobutano en el reactor. **El resultado final es una mayor calidad de alquilado y menor consumo de ácido a costa de un sedimentador más grande y con mayores costos de mezcla.**

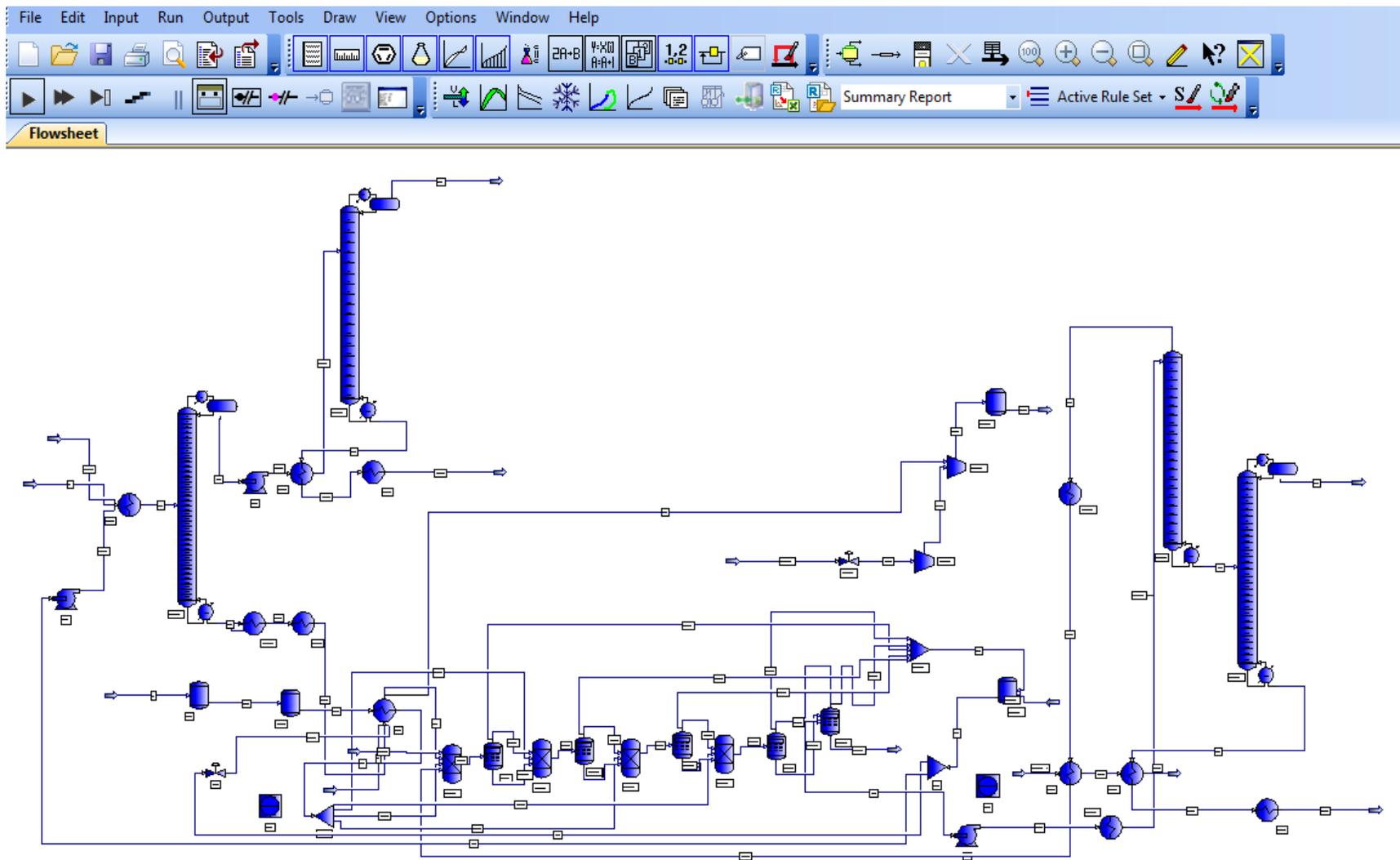
Los valores totales de vapor, caudales de efluentes del reactor y el contenido isobutano, las cargas de refrigeración, y los flujos de los productos, se resumen en la en la Tabla 3-5. Y en la Figura 3-6 se muestra la simulación de la planta de alquilación con el programa PRO II. El diagrama de flujo del proceso de alquilación se muestra en la figura 3-7.

Tabla 3-5. Valores totales de los productos

	Más nC ₄ en la alimentación reportado en literatura	Simulación
Parámetros de entrada en el flujo		
C3 en la depropanizadora, moles/h	50	50
Recirculación del iso-stripper barriles/h	2525	2525
Adicionar butano en la línea de alimentación saturada, barriles/h	1	50
Cálculo de los parámetros de flujo		
Calor en el Reboiler, 10 ⁶ Btu/h		
Deetanizador DEC2	1	1.18
Depropanizador DEC3	28.46	30.83
Iso-stripper DIC4	80.69	80.12
Debutanizador DEC4	11.73	10.84
Total de calor en el reboiler	122.05	122.97
Ácido líquido del efluente del reactor		
Volumen del flujo, GPM	2214	2209.4
Contenido en isobutano, volumen liquido %	64.0	63.28
Potencia del eje del compresor, Hp		
Compresor 1	1044	968.34
Compresor 2	2069	1893.39
Total del calor en los compresor	3113	2861.73
Flujos de los productos en condiciones estándar		
Productos de gas, m ³ /h		
Gas combustible	17.44	15.29
Productos líquidos, barriles/h		
Propano líquido	110.8	116.28
Butano	168.7	141.49
12 RVP alquilado	522.6	521.45

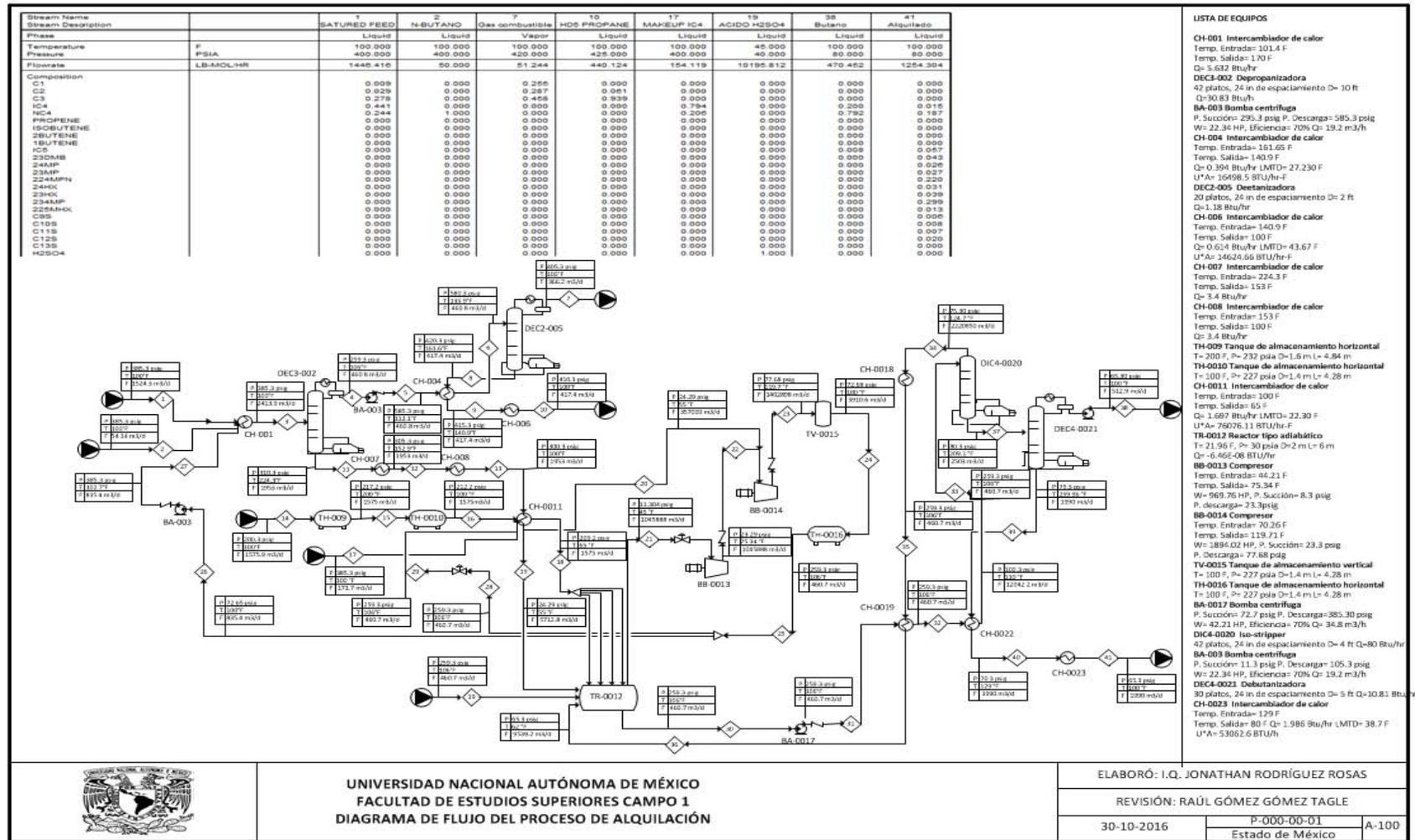
Fuente: SimSci-Esscor (2013). PRO II 9.2. Sulfuric Acid Alkylation Casebook.

Figura 3-6. Simulación de la planta de alquilación



Fuente: SimSci-Esscor (2013). PRO II 9.2. Sulfuric Acid Alkylation Casebook.

Figura 3-7. Diagrama de flujo del proceso de alquilación.



Fuente: Elaborado por autor en el programa VISIO.

Para llevar a cabo la ingeniería de detalle y desarrollar el diagrama de tubería e instrumentación, me guiaré de la Norma de Referencia: NFR-032-PEMEX-2012. SISTEMAS DE TUBERÍA EN PLANTAS INDUSTRIALES-DISEÑO Y ESPECIFICACIONES DE MATERIALES, ya que establece los requerimientos mínimos aplicables a la ingeniería de diseño y especificaciones de materiales de la tubería utilizada en los procesos que se llevan a cabo en las instalaciones industriales terrestres y costa fuera de los centros de trabajo de Petróleos Mexicanos y Organismos subsidiarios.

El reactor estará diseñado de acuerdo con la sección VIII, división 1 del Código ASME. En la Tabla 3-6 se presentan las especificaciones sobre los materiales para recipientes a presión.

Tabla 3-6. Materiales para recipientes a presión y tanques atmosféricos

Equipo	Componentes	Materiales	Norma
Recipientes a presión	Cuerpo	Acero al carbón	ASTM-A285 Gr C
	Tapas	Acero al carbón	ASTM-A285 Gr C
	Soportes	Acero al carbón	ASTM-A36
	Anillo para sujeción de aislamiento	Acero al carbón	ASTM-A36
	Tornillos	Acero al carbón	ASTM-A 193
	Tuercas	Acero al carbón	ASTM-194
	Empaques	Asbesto	
	Placa de desgaste	Acero inoxidable T316	ASTM-296 ASTM-A 53
	Interiores	Acero al carbón	ASTM-A 105
	Conexiones bridas	Acero al carbón	ASTM-A 181
Bridas			

Fuente: Elaborado por autor.

La Tabla La Tabla 3-7 muestran el consumo de las sustancias empleadas en el proceso de generación de alquilado.

Tabla 3-7. Sustancias empleadas en el proceso de alquilación

Sustancia	Flujo o consumo	Cantidad máxima/almacén	Concentración
Alimentación Saturada	0.0176 m ³ /s	No aplica	
N-butano	0.00001 m ³ /s	No aplica	
Olefinas	0.0182 m ³ /s	0.15 m ³	
Isobutano	1.088 m ³ /s	No aplica	
Ácido sulfúrico	37.8993 m ³ /s	10 ⁶ lb/h	100 %

Fuente: Elaborado por autor.

La evaluación de las actividades consideradas como riesgosas se realiza con base en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), Capítulo IV, del Título IV, Artículo 147 y los listados 1 y 2 de la Secretaría de Gobernación que determina las cantidades de reporte.

De acuerdo con la descripción del proceso y el listado de sustancias que se emplearán en las etapas de operación, las sustancias altamente riesgosas que se manejarán en el proceso, contenidas en los Listados de Actividades Altamente Riesgosas para sustancias tóxicas (primer listado) y sustancias inflamables y explosivas (segundo listado) de la Secretaría de Gobernación, se indican en la Tabla 3-8.

Tabla 3-8. Sustancias altamente riesgosas que se manejan en el proceso

Sustancia / estado	Listado / propiedad	Cantidad de reporte	Cantidad del proceso
Ácido sulfúrico / gas	Primer y segundo / corrosivo	10 - 500 kg	Está en estado líquido
Gas combustible (metano, propano, butano, butileno, isobutileno, propileno, isobutano, propano)/ gas	Segundo / inflamable	500 kg	2.562 kg
Propano / gas	Segundo / inflamable	500 kg	Está en estado líquido
Butano / gas	Segundo / inflamable	500 kg	Está en estado líquido
Alquilado (n-butano, 2,2,4-trimetil-pentano-2,3,4-trimetil-1-penteno)/líquido	Segundo/ inflamable	10,000-20,000 kg	15.434 kg

Fuente: Elaborado por autor.

En este caso en específico, los productos obtenidos no rebasan las cantidades señaladas en el reporte del Segundo Listado de Actividades Altamente Riesgosas. Sin embargo, este proceso es catalogado como una operación que representa un peligro intermedio, ya que maneja materiales inflamables con el potencial de producir una nube de vapor y con la probabilidad de generar una explosión.

En el Anexo 1 se incluye la hoja de datos de seguridad del ácido sulfúrico, que contiene las propiedades fisicoquímicas que se emplearán en el análisis de consecuencias (simulaciones) de los eventos riesgosos asociados a dicha sustancia en la planta de alquilación.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE
RIESGO Y OPERABILIDAD
(HAZOP) AL PROCESO DE
ALQUILACIÓN DE OLEFINAS
CON H₂SO₄.

Capítulo 4. Análisis de riesgo y operabilidad (HAZOP) al proceso de alquilación de olefinas con H_2SO_4

4.1 Antecedentes de accidentes e incidentes

PEMEX es la empresa responsable en nuestro país de la generación y distribución de los productos derivados del petróleo, el cual también es encargado de registrar los accidentes o incidentes dentro o fuera de sus instalaciones; no obstante, el proceso de alquilación que se lleva a cabo dentro de sus refinerías de PEMEX, utiliza ácido fluorhídrico como catalizador, por lo que no se puede comparar en instalaciones similares accidentes o incidentes en el manejo con ácido sulfúrico. Sin embargo los riesgos asociados al uso de ácido sulfúrico en la industria están ligados a la fuga del fluido en emergencias ambientales, en México se ha reportado el siguiente y más catastrófico accidente:

El 6 de agosto del 2014, ocurrió el peor desastre ambiental en el estado de Sonora. La mina Buena Vista del Cobre operada por Grupo México, derramó en el Río Bacanuchi de Sonora, 40 mil m^3 de una solución de ácido sulfúrico que contenía sulfato de cobre y otros metales, con altas concentraciones de metales pesados muy dañinos para la salud y para los ecosistemas.

Esta descarga de lixiviados mineros con arsénico, níquel, fierro, cobre, cadmio, manganeso y aluminio, pusieron en riesgo a por lo menos 22 mil personas que habitan en 7 municipios aledaños a los ríos Sonora y Bacanuchi: San Felipe, Arizpe, Aconchi, Banamichi, Ures, Baviácora y Hermosillo.

Entre los daños que pueden causar los altos niveles de metales en el agua son problemas en el sistema nervioso, daños hepáticos, pulmonares, renales, reproductivos y neurológicos, que pueden propiciar enfermedades como el Alzheimer, mal de Parkinson, saturnismo, hepatitis, cáncer, hemocromatosis o hasta la muerte, en el caso del arsénico.

4.2 Metodología de identificación y jerarquización

Es conveniente mencionar que hay dos aspectos básicos que se deben considerar para desarrollar el análisis de riesgo y operabilidad; detectar los puntos críticos, jerarquizarlos y seleccionar opciones.

El primero consiste en **detectar los puntos críticos** en los cuales se pueden presentar fallas susceptibles de impacto negativo a las instalaciones y su entorno.

El segundo aspecto básico a considerar consiste en **jerarquizar** a fin de poder seleccionar las opciones para su atención, aplicando un análisis costo-beneficio que permita el desarrollo industrial sin descuidar los aspectos de protección a los ecosistemas, al hombre y a sus bienes.

El diagnóstico de seguridad para esta planta de alquiler involucrará responder una serie de preguntas:

- ¿Existen riesgos reales y potenciales?, si es así,
- ¿Cuáles son?
- ¿De qué magnitud son?
- ¿Son aceptables?, si no es así,
- ¿Cómo se pueden eliminar o reducir?

Las respuestas a estas exigencias pueden obtenerse a través del HAZOP. Este proceso requiere de cubrir las siguientes etapas generales:

- 1 Etapa: Conocer a detalle las características el proceso, los materiales utilizados y su entorno para la identificación primaria de la existencia de posibles riesgos reales y potenciales.
- 2 Etapa: Identificar los riesgos específicos existentes.
- 3 Etapa: Evaluar la magnitud del evento y cuantificar sus consecuencias posibles, y si fuese necesario, evaluar la probabilidad de ocurrencia.
- 4 Etapa: Establecer las medidas preventivas necesarias para eliminar o minimizar el riesgo hasta el grado de aceptación del mismo.

En todo diagnóstico es indispensable seguir la secuencia de las etapas ya mencionadas para optimizar los resultados del diagnóstico, después se podrá establecer los **valores límites permisibles**, ya que éstos permiten:

SALVAGUARDAR LA SALUD Y LOS BIENES DE LOS HABITANTES QUE VIVEN ALREDEDOR, O EN VECINDAD CON INSTALACIONES DE ALTO RIESGO.

En este sentido, se considera como parámetro de protección los siguientes:

1. Afectación por sustancias tóxicas:

Se valora utilizando un índice conocido como IDLH, en ppm o mg/m^3 , que es el valor máximo de una sustancia tóxica, al cual una persona puede escapar sin sufrir daños irremediables a su salud, si se expone por un período de 30 minutos. Con este valor la SEDESOL determina la zona de exclusión o zona de alto riesgo.

Otro tipo de medición para sustancias tóxicas es el TLV_8 y TLV_{15} , en ppm o mg/m^3 , estos señalan los valores promedio máximos a los que una persona puede estar expuesta durante 8 horas o 15 minutos respectivamente, sin que dañe su salud.

Con estos tipos de valores TLV₈ y TLV₁₅, se define la **zona de amortiguamiento**, esto es, espacios que permitan cubrir los riesgos que pueda ocasionar una sustancia tóxica.

2. Afectación por sustancias explosivas

El valor que SEDESOL ha establecido como seguro en estos casos es el de 1/2 lb/in², con él se calcula la **zona de alto riesgo**, esto es: se traza un círculo, se marca su centro y a partir de allí se mide y se señalan los puntos de la onda de presión de 1/2 lb/in².

En este caso la zona de amortiguamiento se define por la distancia en que se presentaría la onda de sobrepresión de 112 lb/in² en la determinación del daño catastrófico probable.

4.3. Modelos de simulación de riesgos.

Con el programa ALOHA me servirá para aplica para efectuar estimaciones de concentraciones de sustancias peligrosas a nivel piso, provenientes de una FUGA GASEOSA o DEL DERRAME DE UN LÍQUIDO QUE SE EVAPORA. Los resultados que reporta el modelo son la distancia de la pluma para alcanzar una concentración dada y el área de "exclusión" o área de riesgo, dentro de la cual se pueden tomar acciones preventivas de evaluación de la población en caso de accidente. El programa ALOHA supone un modelo de dispersión de una racha de viento y el modelo de nubes explosivas:

- Modelo de dispersión de una racha de viento

Considera la dispersión de una racha de viento tridimensional, o burbuja, formado por la masa de una sustancia que es liberada a la atmósfera en unos cuantos segundos, tal como una nube de gas provocada por la explosión o ruptura de una esfera de almacenamiento.

- Modelo de nubes explosivas

El caso del modelo de nubes explosivas se considera para gases en estado líquido por enfriamiento, para gases en estado líquido por efecto de una presión y para gases sujetos a presiones de 500 psi o mayores así como líquidos inflamables o combustibles a una temperatura mayor a su punto de ebullición y mantenidos en estado líquido por efectos de presión (exceptuando materiales con viscosidad mayor a 1⁻⁶ centipoises o puntos de fusión sobre 212 ° F.

4.4. Zona intermedia de salvaguarda

Como resultado de todo lo anterior y de la evaluación de los estudios de riesgo, se establece la necesidad de instaurar una **zona intermedia de salvaguarda** a fin de proteger a la población y ambiente de los riesgos derivados de la actividad de la industria riesgosa.

La zona intermedia de salvaguarda; en términos generales, se define como aquella zona determinada del resultado de la aplicación de criterios y modelos de simulación de riesgo ambiental, que comprende las áreas en las cuales se presentarían límites superiores a los permisibles para la salud del hombre y afectaciones a sus bienes y al ambiente en caso de fugas accidentales de sustancias tóxicas y de presencia de ondas de sobrepresión en caso de formación de nubes explosivas; esta zona está conformada, a su vez, por dos zonas: la zona de riesgo y la zona de amortiguamiento.

La zona de riesgo; es una zona de restricción total, en la que no se debe permitir ningún tipo de actividad, incluyendo los asentamientos humanos y la agricultura, con excepción de actividades de forestación, el cercamiento y señalamiento de la misma, así como el mantenimiento y vigilancia.

La zona de amortiguamiento; es una zona donde se pueden permitir determinadas actividades productivas que sean compatibles, con la finalidad de salvaguardar a la población y al medio ambiente, restringiendo el incremento de la población ahí asentada y capacitándola en los Programas de Emergencia que se realicen para tal efecto.

Utilizaré el método HAZOP, para verificar que el diseño de esta planta sea factible, identificar los riesgos de interés, incrementar el nivel de seguridad de la instalación y examinar de qué manera se pueden reducir o eliminar los riesgos que presentan estos peligros a los trabajadores, a la instalación o al medio ambiente.

Con la evaluación cuantitativa de riesgo determinare la frecuencia y la probabilidad relativa que ocurrirá un evento peligroso específico, para lo cual utilizaré la técnica de matriz de jerarquización de riesgos, que me permitirá definir y evaluar los distintos escenarios posibles relacionados con el proceso. Con base en los resultados de jerarquización obtenidos, calcule los índices de riesgo correspondientes a cada uno de los escenarios de accidente previamente identificados.

Los parámetros clave de proceso normalmente usados en el HAZOP son: Flujo, presión, temperatura, etc.; sin embargo, pueden utilizarse otros parámetros de proceso, según convenga al análisis y al equipo de análisis de riesgos. Para cada sección del proceso se evalúa un grupo estándar de desviaciones potenciales, tales como las que se mencionan en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1. Desviaciones típicas para cada sección de proceso

Desviación	Tipo de sección de proceso	
	Tanques / recipientes	Línea con bomba
Flujo Alto		X
Flujo bajo o cero flujo		X
Flujo inverso o flujo mal dirigido		X
Nivel alto	X	
Nivel bajo	X	
Alta temperatura	X	X
Baja temperatura	X	X
Alta presión	X	X
Baja presión	X	X
Alta concentración de contaminantes	X	X
Desviaciones durante la puesta en operación	X	X
Desviaciones durante la operación	X	X
Desviaciones durante el paro	X	X

Fuente: Elaborado por autor.

Para cada palabra clave deben considerarse las causas que pueden originar la desviación, las consecuencias, salvaguardas y recomendaciones o acciones a seguir para atender dicha desviación, o en su defecto, indicar la necesidad de realizar estudios más completos o establecer que se requiere contar con más información para evaluar la desviación.

Existen causas típicas de fuga o ruptura de varios tipos de equipos de proceso que se consideran en un análisis HAZOP, las cuales se mencionaron en la Tabla 1-6 del capítulo 1. En general, no se toman en cuenta otras causas genéricas de riesgo de proceso, ni tampoco se mencionan como causas de desviaciones del proceso la mayoría de los eventos externos. Sin embargo, se consideran los efectos de daños en los equipos y de fugas producidas por los impactos externos más comunes (choque de vehículos, choque de cargas de grúas, etc.).

La división de los nodos o puntos críticos de estudio para el análisis HAZOP del proceso de manejo de ácido sulfúrico, se realizó con base al diagrama de tubería e instrumentación y en el diagrama de flujo del proceso. La selección de cada nodo se realizó considerando la intención de diseño de cada sección del proceso (ya sea sistema o subsistema) asociada al manejo del ácido sulfúrico, así como a la posibilidad de ocurrencia de algún evento riesgoso debido a cambios en las condiciones de operación.

Así, los nodos de estudio considerados por el equipo de análisis de riesgo son los siguientes, mismos que aparecen en la Figura 4-1.

a) Nodo 1: Desde el punto de alimentación del ácido a la entrada del reactor. Color azul

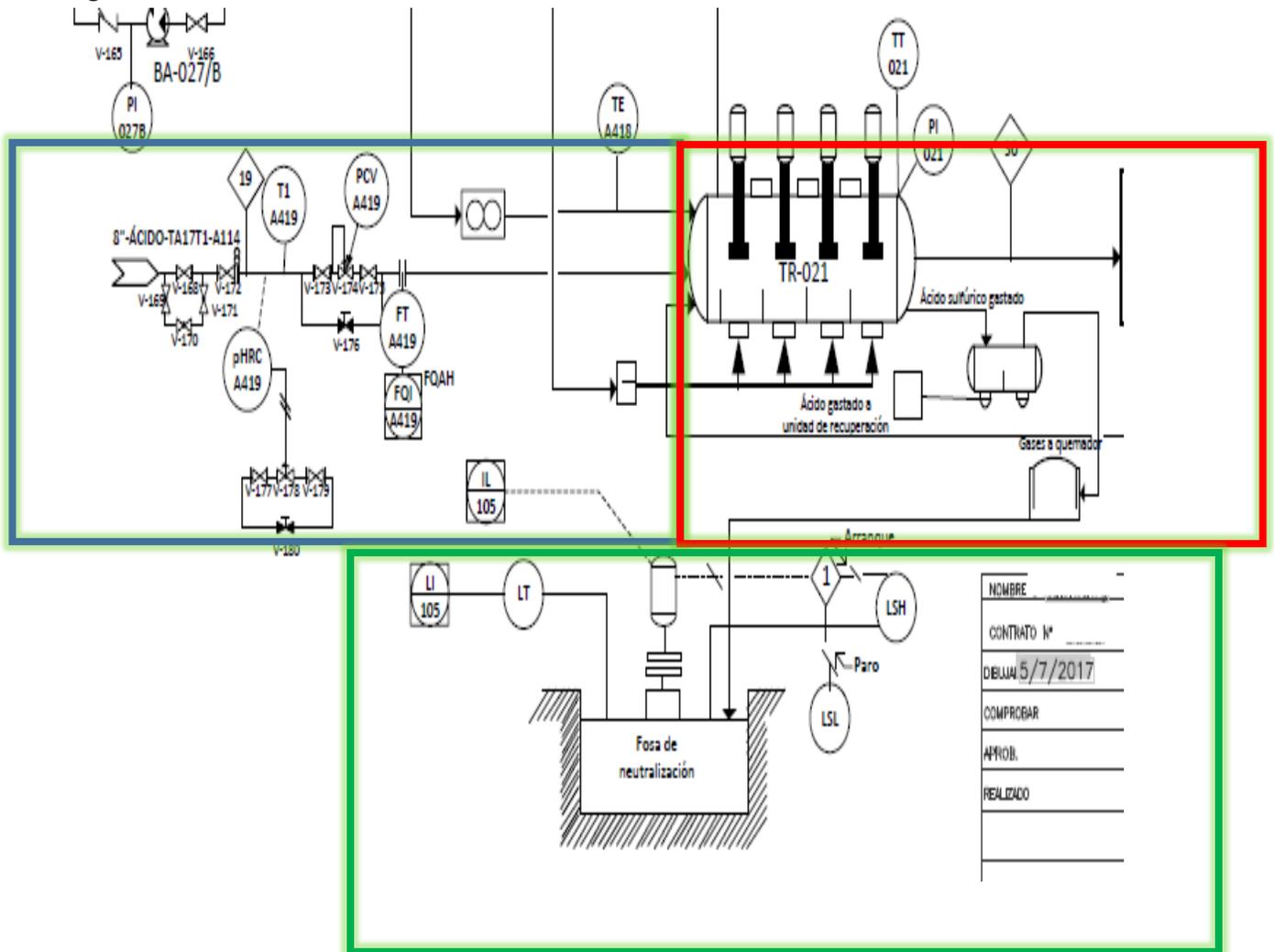
Intención de diseño: Realizar la secuencia de la reacción

Condiciones de operación: P = 40 psia; T = 45 °F; d= 8"

b) Nodo 2: Dentro del reactor Color Rojo.
 Intención de diseño: Realizar las reacciones exotérmicas.
 Condiciones de operación: P = 30 psia; T = 45 °F

c) Nodo 3: De la salida del reactor a la fosa de neutralización. Color Verde.
 Intención de diseño: Neutralizar el ácido decantado.
 Condiciones de operación: P = 26 psia; T = 44.26 °F; d = 8"

Figura 4-1. Nodos de estudio en el DTI.



Fuente: Elaborado por autor en el programa VISIO.
 En el Anexo 2 se muestra el diagrama de tubería e instrumentación del proceso de alquilación.

Con los datos de entrada colectados y analizados, se debe estimar la tasa de descarga en kg/s de cada escenario y con ello poder estimar la cantidad de masa liberada, la cual es la base para calcular los efectos de sobrepresión y radiación térmica. Para definir el diámetro de fuga se debe considerar un 20 por ciento máximo del diámetro de la tubería.

El tiempo de fuga es el tiempo expresado en segundos, que transcurre desde que se presenta la fuga, hasta que ésta es aislada cerrando las válvulas de seccionamiento.

Las categorías de evaluación de consecuencias como se muestra en la Tabla 4-2, permiten identificar la magnitud de las afectaciones en relación con los daños probables tanto a la salud como a la economía de la instalación. Por otro lado, la probabilidad de ocurrencia de un incidente mostrada en la Tabla 4-3 depende directamente del nivel de protección del equipo, así como de la frecuencia de fallas que se presentan como eventos iniciantes en el desarrollo de los escenarios evaluados.

Tabla 4-2. Categorías de evaluación de consecuencias

Categoría	Consecuencia	Descripción
4	Catastrófica	Fatalidad/daños irreversibles y pérdidas de producción mayores a USD \$1 000 000,00
3	Severa	Heridas múltiples/daños mayores a propiedades y pérdidas de producción entre USD \$100 000,00 y USD \$ 1 000 000,00
2	Moderada	Heridas ligeras/daños menores a propiedades y pérdidas de producción entre USD \$10 000,00 y USD \$100 000,00
1	Ligera	No hay heridas/daños mínimos a propiedades y pérdidas de producción menores a USD \$10 000,00

Fuente: JBF Associates, Inc., Knoxville, TN (CCPs, 1995).

Tabla 4-3. Categorías de evaluación de frecuencias de incidentes

Categoría	Frecuencia	Descripción
4	Frecuente	Se espera que ocurra más de una vez por año
3	Poco frecuente	Se espera que ocurra más de una vez durante el tiempo de vida de la instalación
2	Raro	Se espera que ocurra no más de una vez en la vida de la instalación
1	Extremadamente raro	No se espera que ocurra durante el tiempo de vida de la instalación

Fuente: JBF Associates, Inc., Knoxville, TN (CCPs, 1995).

Una vez determinada la frecuencia y las consecuencias potenciales de cada evento identificado en el análisis HAZOP, se procede a caracterizar y jerarquizar el riesgo del mismo mediante el cruce de frecuencia y consecuencia en una matriz de riesgo; de esta manera se obtiene el índice ponderado de riesgo de cada evento. La matriz de riesgo utilizada para caracterizar y jerarquizar los riesgos en el proceso se presenta en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4. Matriz de caracterización y jerarquización de riesgos

Índice ponderado de riesgo			Categorías de consecuencia			
			Ligero	Moderado	Severo	Catastrófico
			1	2	3	4
Categorías de frecuencia	Frecuente	4	IV	II	I	I
	Poco frecuente	3	IV	III	II	I
	Raro	2	IV	IV	III	II
	Extremadamente raro	1	IV	IV	IV	IV

Fuente: JBF Associates, Inc., Knoxville, TN (CCPs, 1995).

La caracterización y jerarquización de los riesgos identificados permite obtener para cada evento un índice ponderado de riesgo (I a IV), que permite jerarquizar las áreas de proceso que requieren de acciones correctivas urgentes o bien, interpretar el riesgo asociado de la instalación con sus posibles efectos. El índice ponderado de riesgos (IPR) se utiliza para jerarquizar y determinar los escenarios que se consideren importantes para el análisis de consecuencias (simulaciones); por lo regular aquellos eventos que resultan en índices ponderados de I y II (intolerables e indeseables), son considerados para el análisis de consecuencias. El índice ponderado de riesgos de los valores de cada evento obtenidos de la matriz citada anteriormente se presenta en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5. Índice ponderado de riesgos

Categoría	Riesgo	Descripción
IV	Razonablemente aceptable	El riesgo es generalmente aceptable. No se requieren medidas de mitigación o abatimiento.
III	Aceptablemente con controles	El riesgo es poco significativo. Se debe revisar que los procedimientos de ingeniería y control se estén llevando a cabo en forma correcta.
II	Indeseable	El riesgo debe ser reducido. Se deben revisar tanto procedimientos de ingeniería como administrativos y en su caso modificar en un período de 3 a 12 meses.
I	Intolerante	El riesgo requiere acción inmediata; el costo no debe ser una limitación y el no hacer nada no es una opción aceptable. Se deben revisar tanto procedimientos de ingeniería como administrativos y en su caso modificar en un período de 3 a 6 meses.

Fuente: JBF Associates, Inc., Knoxville, TN (CCPs, 1995).

Como un criterio adicional para la jerarquización de riesgos, se procedió a establecer un índice de riesgo (IR), definido como el producto de la categoría de frecuencia por la categoría de consecuencia de cada evento identificado. Los valores del índice de riesgo están en el rango de 1 (riesgo mínimo) hasta 16 (riesgo máximo), lo cual implica que mientras mayor es el índice resultante, más énfasis se debe poner en la mitigación de dicho evento.

Se procedió a realizar la jerarquización de los riesgos ordenándolos de mayor a menor tanto en el índice ponderado de riesgo (IPR) (de los riesgos intolerables tipo A, a riesgos aceptables tipo D, como del cálculo del índice de riesgo (IR). La lista de eventos identificados se presenta en la Tabla 4-6. Aparece en color amarillo los escenarios que se seleccionaron como accidentes potenciales máximos, indicándose la desviación bajo la cual se originaron, la causa, el efecto anticipado y la categoría de riesgo. Una vez analizados detalladamente los eventos, se consideró adecuado renombrar los escenarios en virtud de las diversas causas que pueden generar las consecuencias indeseables.

Tabla 4-6. LISTA DE EVENTOS IDENTIFICADOS MEDIANTE EL ANÁLISIS HAZOP Y EVALUACIÓN POR MATRIZ DE JERARQUIZACIÓN DE RIESGOS DEL PROCESO.

Nota: C= Consecuencia; F= Frecuencia; IPR= Índice Ponderado de Riesgo IR= Índice de Riesgo En amarillo se indican aquellos eventos que se determinó que fueran escenarios de simulación (es) para el análisis de consecuencias										
Nodo 1: Desde el punto de alimentación del ácido sulfúrico a la entrada del reactor. Intención de diseño: Realizar la secuencia de la reacción Condiciones de operación: P = 40 psia; T = 45 °F; d= 8"										
No. Evento	Palabra Guía	Desviación	Causas	Consecuencias	Salvaguardas	C	F	IPR	IR	Recomendaciones
1	Más	Presión	Falla en la válvula controladora de presión, golpe de ariete.	Posibilidad de fuga en accesorios y bridas.	Regulación y medición de la presión de alimentación <i>By-pass</i> .	1	2	IV	2	Comunicación con el personal operativo para realizar los ajustes operacionales.
2		Flujo	Fallas en las válvulas Error humano: cierre parcial de las válvulas de bloqueo.	Sobrellenado en el reactor.	Regulación y medición de flujo en la alimentación <i>By-pass</i> .	3	2	III	6	Planeación efectiva del suministro de la alimentación saturada.
3		Temperatura	Fuente de calor debido a una explosión adyacente.	Dilatación y rompimiento de la tubería lo que provocaría la fuga del ácido y al calentarse formaría humos tóxicos o irritantes.	Aislamiento térmico frío Juntas de expansión Detectores de gas y humo; Sistema contra incendio.	4	1	IV	4	Aplicación del plan de emergencia.
4	Menos	Presión	Bajo suministro del ácido.	Disminución de la potencia entregada por el sistema.	Regulación y medición de alimentación.	1	2	IV	2	Capacitación adecuada y aplicación de procedimientos operativos.
5		Flujo	Error humano: cierre parcial de las válvulas de bloqueo.	Pérdida del producto intermedio y final.	Regulación y medición de alimentación.	2	2	IV	4	Colocación de sistemas de candado para evitar cierre de válvulas.

LISTA DE EVENTOS IDENTIFICADOS MEDIANTE EL ANÁLISIS HAZOP Y EVALUACIÓN POR MATRIZ DE JERARQUIZACIÓN DE RIESGOS DEL PROCESO

Nota: C= Consecuencia; F= Frecuencia; IPR= Índice Ponderado de Riesgo; IR= Índice de Riesgo En amarillo se indican aquellos eventos que se determinó que fueran escenarios de simulación (es) para el análisis de consecuencias										
Nodo 1: Desde el punto de alimentación del ácido sulfúrico a la entrada del reactor. Intención de diseño: Realizar la secuencia de la reacción Condiciones de operación: P = 40 psia; T = 45 °F; d= 8"										
No. Evento	Palabra Guía	Desviación	Causas	Consecuencias	Salvaguardas	C	F	IPR	IR	Recomendaciones
6	Menos	Temperatura	Congelamiento de ducto por condiciones atmosféricas extremas (heladas).	Que el ácido sulfúrico llegue a su punto de fusión y se quede incrustado en la tubería.	Aislamiento térmico.	1	1	IV	1	Incluir en el programa de mantenimiento las tuberías, válvulas, accesorios e instrumentos. Capacitación al personal.
7	Ningún(a)	Flujo	Ruptura total del tubo de 8" por impacto extremo o sabotaje.	Fuga masiva del ácido sulfúrico el cual al derramarse y al calentarse se puede evaporar.	Cierre de válvulas, detectores de gas y de humo, sistema contra incendio.	4	2	II	8	Barreras de protección en zonas vulnerables; vigilancia adecuada; activación del plan de emergencia.
8		Presión	Ruptura total del tubo de 8" por impacto extremo o sabotaje.	Fuga masiva del ácido sulfúrico el cual al derramarse y al calentarse se puede evaporar.	Cierre de válvulas, detectores de gas y de humo, sistema contra incendio.	4	2	II	8	Barras de protección en zonas vulnerables; activación del plan de emergencia.
9		Mantenimiento	Falta de detección de corrosión y posible fuga en la tubería de 8".	Corrosión en la tubería lo que pudiera originar hidrógeno que es un gas inflamable y explosivo en caso de presentarse una fuente de ignición.	Programa de mantenimiento Pruebas no destructivas.	4	2	II	8	Cumplimiento de los programas de inspección; barreras de protección en zonas vulnerables.

LISTA DE EVENTOS IDENTIFICADOS MEDIANTE EL ANÁLISIS HAZOP Y EVALUACIÓN POR MATRIZ DE JERARQUIZACIÓN DE RIESGOS DEL PROCESO

Nota: C= Consecuencia; F= Frecuencia; índice Ponderado de Riesgo; IR= Índice de Riesgo En amarillo se indican aquellos eventos que se determinó que fueran escenarios de simulación (es) para el análisis de consecuencias										
Nodo 2: Dentro del reactor. Intención de diseño: Realizar las reacciones exotérmicas. Condiciones de operación: P = 30 psia; T = 45 °F										
No. Evento	Palabra Guía	Desviación	Causas	Consecuencias	Salvaguardas	C	F	IPR	IR	Recomendaciones
10	Más	Presión	Paro o falla de una válvula de liberación de presión.	Pérdida del control de la reacción como resultado de una pérdida de mezcla.	Válvula de seguridad. Desfogue. Disco de ruptura.	3	2	III	6	Incluir en el programa de mantenimiento las tuberías, válvulas, accesorios e instrumentos. Capacitación al personal.
11		Flujo	Error humano: Pérdida del control del llenado de protección.	Sobrellenado del reactor y posible derrame.	Alarmas de nivel Diques de contención. Capacitación al personal. Drenaje químico.	2	2	IV	2	Planeación efectiva del suministro de la alimentación. Capacitación al personal.
12		Temperatura	Error humano: Por operar incorrectamente el reactor.	Reacción espontánea de polimerización, Consumo excesivo del ácido.	Alarmas por media y alta temperatura. Capacitación al personal Chaqueta de enfriamiento.	3	2	III	6	Capacitación adecuada y aplicación de procedimientos operativos.
13	Menos	Flujo	Ruptura y fuga por impacto externo.	Liberación masiva de hidrocarburo hirviendo, hidrógeno y ácido sulfúrico.	Alarmas por medio y bajo nivel. Diques de contención Sistema contra incendios.	4	2	II	8	Barras de protección en zonas vulnerables. Activación del plan de emergencia.

LISTA DE EVENTOS IDENTIFICADOS MEDIANTE EL ANÁLISIS HAZOP Y EVALUACIÓN POR MATRIZ DE JERARQUIZACIÓN DE RIESGOS DEL PROCESO

Nota: C= Consecuencia; F= Frecuencia; Índice Ponderado de Riesgo; IR= Índice de Riesgo En amarillo se indican aquellos eventos que se determinó que fueran escenarios de simulación (es) para el análisis de consecuencias										
Nodo 2: Dentro del reactor. Intención de diseño: Realizar las reacciones exotérmicas. Condiciones de operación: P = 30 psia; T = 45 °F										
No. Evento	Palabra Guía	Desviación	Causas	Consecuencias	Salvaguardas	C	F		IR	Recomendaciones
14	Menos	Presión	Un choque térmico.	Cuando el reactor es vaciado y enfriado muy rápido.	Alarmas indicadoras por media y baja presión.	1	2	IV	2	Incluir en el programa de mantenimiento. Capacitación al personal. Controlar las condiciones a las cuales el fabricante manda.
15		Temperatura	Error humano: Falla en el control del proceso.	Aumenta la carga de refrigeración lo que generan más costos en el diseño.	Alarmas indicadoras por media y baja temperatura.	1	2	IV	1	Capacitación adecuada y aplicación de procedimientos operativos.
16	Ningún	Mantenimiento	Demanda extraordinaria del producto.	Desgaste a corto plazo del material de construcción del reactor y posibles fisuras debido a la corrosión que pueden provocar goteo del hidrocarburo hirviendo, del hidrógeno y ácido sulfúrico.	Diques de contención, muros contra incendio.	4	1	IV	4	Incluir en el programa de mantenimiento. Capacitación al personal. Controlar las condiciones a las cuales el fabricante manda.

LISTA DE EVENTOS IDENTIFICADOS MEDIANTE EL ANÁLISIS HAZOP Y EVALUACIÓN POR MATRIZ DE JERARQUIZACIÓN DE RIESGOS DEL PROCESO

Nota: C= Consecuencia; F= Frecuencia; Índice Ponderado de Riesgo; IR= Índice de Riesgo En amarillo se indican aquellos eventos que se determinó que fueran escenarios de simulación (es) para el análisis de consecuencias										
Nodo 3: De la salida del reactor a la fosa de neutralización. Intención de diseño: Neutralizar el ácido decantado. Condiciones de operación: P = 26 psia; T = 44.26 °F; d = 8”										
No. Evento	Palabra Guía	Desviación	Causas	Consecuencias	Salvaguardas	C	F	IPR	IR	Recomendaciones
17	Más	Temperatura	Fuente de calor debido a una explosión adyacente.	Dilatación y rompimiento de la tubería lo que provocaría la fuga del ácido y al calentarse formaría humos tóxicos o irritantes.	Aislamiento térmico. Juntas de expansión Detectores de gas y humo; Sistema contra incendio.	4	1	IV	4	Activación del plan de emergencia.
18	Menos	Flujo	Error humano: Cierre parcial de la válvula de bloqueo del drenaje.	Retraso en tiempo para que llegue todo el ácido decantado a la fosa de neutralización.	Capacitación al personal.	1	2	IV	2	Capacitación adecuada y aplicación de procedimientos operativos.
19	Ningún(a)	Flujo	Ruptura total del tubo de 8” por impacto extremo o sabotaje.	Fuga masiva del ácido sulfúrico el cual al derramarse y al calentarse se puede evaporar.	Cierre de válvulas, detectores de gas y de humo, sistema contra incendio.	4	2	III	8	Barreras de protección en zonas vulnerables; vigilancia adecuada; activación del plan de emergencia.
20		Presión	Ruptura total del tubo de 8” por impacto extremo o sabotaje.	Fuga masiva del ácido sulfúrico el cual al derramarse y al calentarse se puede evaporar.	Cierre de válvulas, detectores de gas y de humo, sistema contra incendio.	4	2	III	8	Barras de protección en zonas vulnerables; activación del plan de emergencia.
21		Mantenimiento	Falta de detección de corrosión y posible fuga en la tubería de 8”.	Corrosión en la tubería que originaría hidrógeno que es gas inflamable y explosivo en caso de presentarse una fuente de ignición.	Programa de mantenimiento Pruebas no destructivas.	4	2	III	8	Cumplimiento de los programas de inspección; barreras de protección en zonas vulnerables.

Los resultados obtenidos del análisis HAZOP y la jerarquización de riesgos aplicados al proceso son los siguientes:

- Se identificaron 21 eventos potenciales de riesgo mediante la técnica HAZOP en los 3 nodos analizados en el sistema
 - De la evaluación semi cuantitativa de los eventos identificados en el análisis HAZOP y su correspondiente valoración en la matriz de ponderación de riesgos, se tiene lo siguiente:
 - 7 eventos categoría II (indeseables)
 - 3 eventos categoría III (aceptables con controles)
 - 9 eventos categoría IV (razonablemente aceptables)
 - 2 eventos sin consecuencias de interés
- a) Para los siete eventos que resultaron con un índice ponderado de riesgo de categoría II, se obtuvo un cálculo del índice de riesgo de 8 (categoría de consecuencia 4, categoría de frecuencia 2).
- b) A partir de los riesgos identificados, realice el análisis de consecuencias de aquellos eventos de categoría II. Estos eventos identificados en la Tabla 4-7.

4.5. Radios potenciales de afectación y su simulación de eventos riesgosos del proceso

Con los datos de entrada colectados y analizados, se debe estimar la tasa de descarga (kg/s) de cada escenario y con ello poder estimar la cantidad de masa liberada, la cual es la base para calcular los efectos de sobrepresión y radiación térmica. Para definir el diámetro de fuga se debe considerar un 20 por ciento máximo del diámetro de la tubería. Por otra parte, para el caso de los equipos de proceso y tanques de almacenamiento, se deberá considerar los casos de liberación masiva de toda la sustancia manejada. En la Tabla 4-7 se muestran los eventos de riesgoso identificados en el análisis HAZOP del proceso, y su respectiva nomenclatura en el análisis de consecuencias.

Tabla 4-7. Eventos de riesgo identificados en el análisis HAZOP para el análisis de consecuencias.

Evento identificado análisis HAZOP			Escenario para análisis de consecuencias (simulaciones)
Evento/Nodo	Desviación	Causas	
7/1	Ningún flujo	Ruptura total del tubo de 8" por impacto externo.	Liberación masiva del ácido sulfúrico de la tubería de 8".
8/1	Ninguna presión	Ruptura total del tubo de 8" por impacto externo.	
9/1	Mantenimiento	Fuga por impacto externo o corrosión en la tubería de 8".	Fuga del ácido sulfúrico por orificio equivalente al 20% del diámetro nominal en la tubería de 8" de diámetro.
13/2	Flujo	Ruptura y fuga por impacto externo.	Liberación masiva del reactor.
19/1	Ningún flujo	Ruptura total del tubo de 8" por impacto externo.	Liberación masiva del ácido sulfúrico de la tubería de 8".
20/1	Ninguna presión	Ruptura total del tubo de 8" por impacto externo.	
21/1	Mantenimiento	Fuga por corrosión en la tubería de 8".	Fuga del ácido sulfúrico por orificio equivalente al 20% del diámetro nominal en la tubería de 8" de diámetro.

Fuente: Elaborado por autor.

La estimación de consecuencias por sobrepresión se debe aplicar las siguientes premisas:

- El modelo o algoritmo a utilizar para estimar los daños por sobrepresión debe ser para un evento de tipo hemisférico.
- Se debe determinar el espacio a un nivel límite de sobrepresión de 0.2 kg/cm² manométricos (3 psig). (Servicios globales de protección, 2003).
- El factor de rendimiento debe ser el establecido para la propia sustancia. En caso de no contar con el dato se puede utilizar un valor de 0.03. (Elsevier, 2015).

La estimación de consecuencias por radiación térmica: Se deberá realizar la simulación de todos y cada uno de los escenarios de fuego, ya sea por incendios de líquido en charco "Pool Fire" o por dardos de fuego "Jet Fire" para el equipo, sistema o planta de interés.

Se debe determinar si para los escenarios dados se alcanzan uno o más de los siguientes niveles de intensidades de radiación térmica que se incluyen en la Tabla 4-8.

Tabla 4-8. Valores límite de radiación

Intensidad de radiación térmica (kW/m ²)	Efecto
5	Para instalaciones normalmente ocupadas por personal. Intensidad a la cual se tienen quemaduras de segundo grado en el cuerpo humano para una exposición de 29 segundos. (NFPA 921, 2008).
12.5	Para instalaciones normalmente NO ocupadas por personal. Intensidad suficiente para prender madera. Se alcanzan temperaturas de auto ignición de varios hidrocarburos.

Fuente: NRF-010-PEMEX-2014.

Una vez simulado se debe mostrar las zonas de consecuencias para:

Proponer medidas de prevención o mitigación a fin de reducir de forma efectiva las consecuencias por fuego y explosión y con dichas medidas:

- Realizar las iteraciones necesarias y/o aplicables para demostrar que se reducen las consecuencias de los escenarios hasta alcanzar sobrepresiones menores a 0.2 kg/cm² (3 psig) y niveles de radiación menores a 5 y 12.5 kW/m² respectivamente.
- Para la seleccionar las medidas de reducción, se deberá partir de suponer que no son suficientes las medidas mitigantes que en ese momento el diseño de la instalación o la instalación misma ya tenga incluidas, debe seleccionar medidas adicionales a las existentes o en su defecto, mejorar las existentes pero con mayores requisitos de desempeño; como puede ser por medio de una tasa de aplicación de agua contra incendio mayor a la de diseño, la cual, para tanques de almacenamiento atmosféricos, comúnmente es de 0.0679 l/s·m² (0.1 U. S. GPM/ft²), para compensar en la misma proporción el espaciamiento que deja de cubrir.

En la presentación del estudios de riesgo para modelaciones deben considerarse las condiciones meteorológicas más críticas del sitio con base en la información, Pemex en su norma de referencia NRF-018-PEMEX-2007 sugiere considerar como condiciones meteorológicas al momento de la fuga una estabilidad clase F y una velocidad del viento de 1.5 m/s para los casos catastróficos y más probables.

A continuación se realizará la simulación y gráficos para los escenarios de riesgo en el programa ALOHA.

- **Datos de los eventos 7, 8, 19 y 20 (liberación masiva del ácido sulfúrico por ruptura total de la tubería de 8").**

```
ALOHA 5.4.7 - [Text Summary]
File Edit SiteData SetUp Display Sharing Help
SITE DATA:
  Location: MÉXICO, AMÉRICA
  Building Air Exchanges Per Hour: 0.34 (unsheltered single storied)
  Time: November 14, 2016 1950 hours ST (using computer's clock)

CHEMICAL DATA:
  Chemical Name: H2SO4                      Molecular Weight: 98.08 g/mol
  Ambient Boiling Point: 323.5° C
  Vapor Pressure at Ambient Temperature: 8.73e-008 atm
  Ambient Saturation Concentration: 0.12 ppm or 1.17e-005%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)
  Wind: 1.5 meters/second from sw at 3 meters
  Ground Roughness: open country           Cloud Cover: 0 tenths
  Air Temperature: 22° C                   Stability Class: F
  No Inversion Height                      Relative Humidity: 20%

SOURCE STRENGTH:
  Direct Source: 126 kilograms/sec         Source Height: 1 meters
  Release Duration: 1 minute
  Release Rate: 126 kilograms/sec
  Total Amount Released: 7,560 kilograms

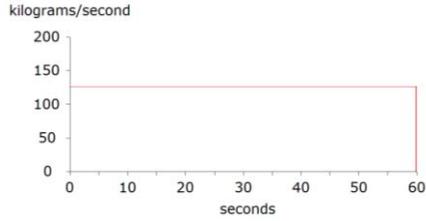
THREAT ZONE:
  Model Run: Heavy Gas
  Red : 1.4 kilometers --- (1560 mg/(cu m))
  Orange: 1.8 kilometers --- (750 mg/(cu m))
  Yellow: greater than 10 kilometers --- (1 mg/(cu m))

THREAT AT POINT:
  Concentration Estimates at the point:
  Downwind: 1 meters                      Off Centerline: 1 meters
  Max Concentration:
  Outdoor: 356,000 mg/(cu m)
  Indoor: 1,560 mg/(cu m)
```

Fuente: Elaborado por el autor en el programa ALOHA.

En la Gráfica 4-1 se muestra la cantidad de kilogramos por segundo, que tomaría una liberación masiva de los eventos 7, 8, 19 y 20 donde se puede observar que se escaparían los 126 kg de ácido sulfúrico en 60 s.

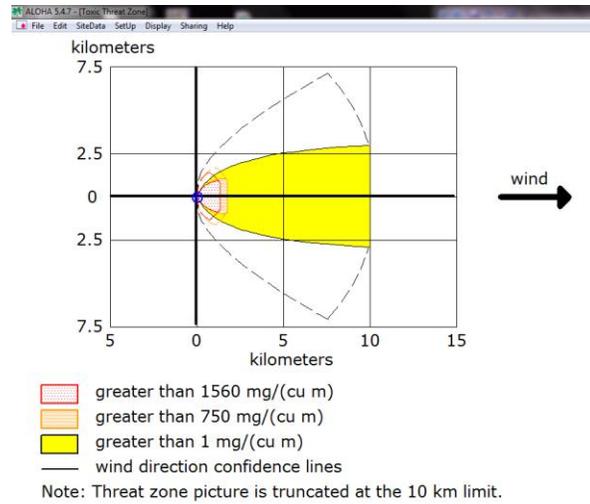
Gráfica 4-1. Gráfica de la liberación masiva de los eventos 7, 8, 19 y 20



Fuente: Elaborado por el autor en el programa ALOHA.

En la figura 4-2 se observa que; en la zona roja hay una máxima concentración de evaporación del ácido sulfúrico de 1560 mg/m^3 en 1.4 km, en la zona naranja hay una concentración de 750 mg/m^3 en 1.8 km y en la zona amarilla hay 1 mg/m^3 hasta los 10 km.

Figura 4-2. Máxima concentración por evaporación del ácido sulfúrico de los eventos 7, 8, 19 y 20.



Fuente: Elaborado por el autor en el programa ALOHA.

En caso de una ruptura total de la tubería en estas condiciones de operación del ácido sulfúrico, **sería una concentración extremadamente nociva de partículas en el aire para la vida y la salud;** ya que comparándolo con las hojas de seguridad, el límite de exposición por el Umbral de la Irritación-Normativa Americana (ACGIH) es de $1 \text{ a } 3 \text{ mg/m}^3$ y 15 mg/m^3 del Nivel Inmediatamente Peligroso para la Vida y la Salud, (IDLH-USA). En caso de incendio del líquido en charco "Pool Fire" no se formaría; debido a que el ácido sulfúrico en su grado de riesgo por inflamabilidad tiene un valor de cero y sólo se descompone a partir de los $340 \text{ }^\circ\text{C}$ generando gas SO_3 .

- Datos de los eventos 9 y 21 (Fuga del ácido sulfúrico por orificio equivalente al 20% del diámetro nominal en la tubería de 8" de diámetro, del punto de alimentación del ácido sulfúrico a la entrada del reactor; es decir $8'' = 0.6667 \text{ ft} \times .20 = 0.13334 \text{ ft}$)

```

ALOHA 5.4.7 - [Text Summary]
File Edit SiteData SetUp Display Sharing Help
Ambient Saturation Concentration: 0.12 ppm or 1.17e-005%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)
Wind: 1.5 meters/second from sw at 3 meters
Ground Roughness: open country          Cloud Cover: 5 tenths
Air Temperature: 22° C
Stability Class: F (user override)
No Inversion Height                    Relative Humidity: 20%

SOURCE STRENGTH:
Leak from hole in horizontal cylindrical tank
Flammable chemical escaping from tank (not burning)
Tank Diameter: 0.6667 feet              Tank Length: 414 feet
Tank Volume: 1,081 gallons
Tank contains liquid                   Internal Temperature: 55° F
Chemical Mass in Tank: 4.92 tons        Tank is 100% full
Circular Opening Diameter: 0.13334 inches
Opening is 0.33 feet from tank bottom
Ground Type: Default soil
Ground Temperature: equal to ambient
Max Puddle Diameter: Unknown
Release Duration: ALOHA limited the duration to 1 hour
Max Average Sustained Release Rate: 4.51e-04 grams/min
(averaged over a minute or more)
Total Amount Released: 0.015 grams
Note: The chemical escaped as a liquid and formed an evaporating puddle.
The puddle spread to a diameter of 2.6 meters.

THREAT ZONE:
Model Run: Gaussian
Red   : 51 meters --- (0.0009 mg/ (cu m))
Orange: 70 meters --- (0.0005 mg/ (cu m))
Yellow: 113 meters --- (0.0002 mg/ (cu m))

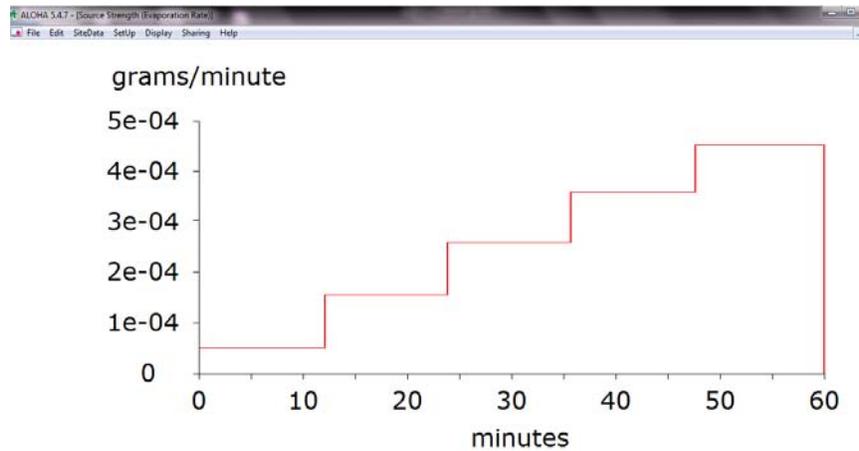
THREAT AT POINT:
Concentration Estimates at the point:
Downwind: 2.5 meters                    Off Centerline: 1 meters
Max Concentration:
Outdoor: 0.0048 mg/ (cu m)
Indoor: 8.24e-04 mg/ (cu m)

```

Fuente: Elaborado por el autor en el programa ALOHA.

En la Gráfica 4-2. Se muestra los gramos por minuto que le tomaría una fuga de los eventos 9 y 21, como se puede observar es demasiado pequeña la cantidad que se liberarían:

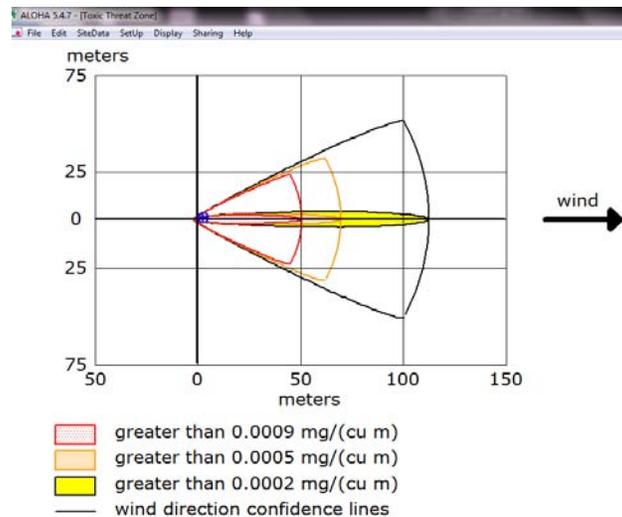
Gráfica 4-2. Gráfica de liberación por fuga de los escenarios 9 y 21.



Fuente: Elaborado por el autor en el programa ALOHA.

En la figura 4-3 se observa que; en la zona roja hay una máxima concentración de evaporación del ácido sulfúrico de 0.0009 mg/m^3 en 51 metros, en la zona naranja hay una concentración de 0.0005 mg/m^3 en 70 km y en la zona amarilla hay 0.0002 mg/m^3 hasta los 133 km.

Figura 4-3. Máxima concentración por evaporación del ácido sulfúrico de los eventos 9 y 21.



Fuente: Elaborado por el autor en el programa ALOHA.

Como se puede notar la fuga no estaría dentro de los límites de exposición, sin embargo es corrosiva al contacto con la piel y también por su propiedad corrosiva con los metales, puede originar hidrógeno que es un gas inflamable y explosivo en caso de presentarse una fuente de ignición.

- **Datos del evento 13 (Liberación masiva del reactor).**

```

ALOHA 5.4.7 - [Text Summary]
File Edit SiteData SetUp Display Sharing Help
Chemical Name: ALQUILADO           Molecular Weight: 62.89 g/mol
Ambient Boiling Point: 70.3° C
Vapor Pressure at Ambient Temperature: 0.020 atm
Ambient Saturation Concentration: 27,172 ppm or 2.72%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)
Wind: 1.5 meters/second from sw at 3 meters
Ground Roughness: open country      Cloud Cover: 5 tenths
Air Temperature: 23° C
Stability Class: F (user override)
No Inversion Height                 Relative Humidity: 50%

SOURCE STRENGTH:
Leak from hole in horizontal cylindrical tank
Flammable chemical escaping from tank (not burning)
Tank Diameter: 8 feet               Tank Length: 51.3 feet
Tank Volume: 2578.3715 cubic feet
Tank contains liquid                Internal Temperature: 45° F
Chemical Mass in Tank: 110 tons      Tank is 100% full
Circular Opening Diameter: 7.9 feet
Opening is 4.00 feet from tank bottom
Ground Type: Concrete
Ground Temperature: equal to ambient
Max Puddle Diameter: Unknown
Release Duration: ALOHA limited the duration to 1 hour
Max Average Sustained Release Rate: 137 kilograms/min
(averaged over a minute or more)
Total Amount Released: 7,967 kilograms
Note: The chemical escaped as a liquid and formed an evaporating puddle.
The puddle spread to a diameter of 139 meters.

THREAT ZONE:
Model Run: Heavy Gas
Red   : 163 meters --- (3.34 grams/(cu m))
Orange: 239 meters --- (2 grams/(cu m))
Yellow: 381 meters --- (1 grams/(cu m))

THREAT AT POINT:
Concentration Estimates at the point:
Downwind: 0.1 meters                 Off Centerline: 1 meters
Max Concentration:
Outdoor: 11.5 grams/(cu m)
Indoor:  3.34 grams/(cu m)

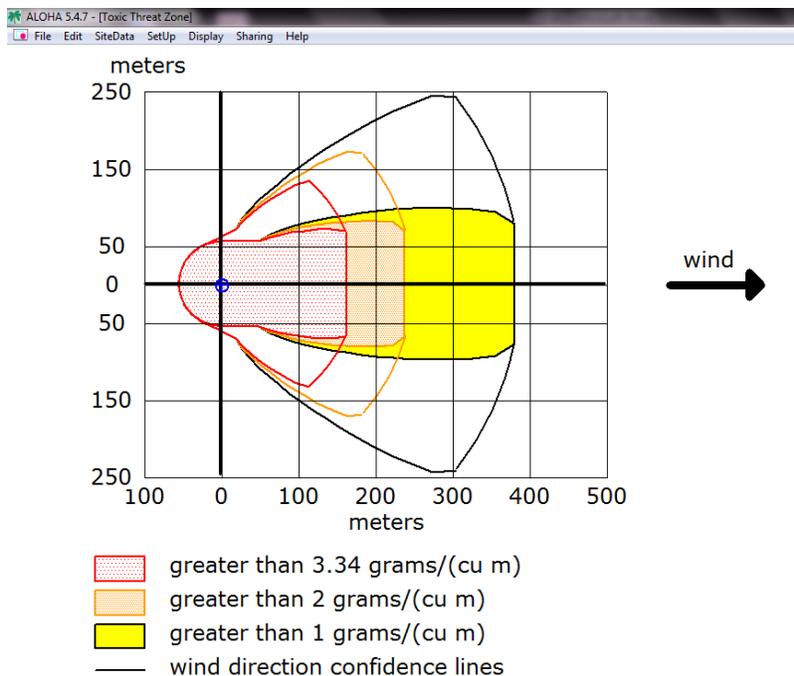
```

Fuente: Elaborado por el autor en el programa ALOHA.

Los datos que nos proporciona el programa ALOHA, nos indica que; si el reactor tuviera una ruptura total, liberaría un líquido (producto intermedio del alquilado), que formaría un charco con una extensión de diámetro de 139 m.

En la figura 4-4 se observa que; en la zona roja hay una máxima concentración de evaporación del alquilado de 3.34 g/m^3 en 163 m, en la zona naranja hay una concentración de 2 g/m^3 en 239 m y en la zona amarilla hay 1 g/m^3 hasta los 381 m.

Figura 4-4. Máxima concentración por evaporación del ácido sulfúrico de los eventos 13



Fuente: Elaborado por el autor en el programa ALOHA.

Sin embargo no podríamos saber si a esa concentración del sub producto de alquilado sería nocivo para la vida o para la salud, aunque; su contenido en ácido sulfúrico representaría también perjudicial, ya sea por contacto o por inhalación. Al ser un producto líquido derivado del petróleo, queda comprendido dentro de los grupos de sustancias inflamables o combustibles; por lo que la Asociación Nacional de Protección contra el Fuego (NFPA) clasifica como aquel líquido clase IA por tener una temperatura de inflamación inferior a $22.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ($73 \text{ }^\circ\text{F}$) y tener un punto de ebullición por debajo de los $37.8 \text{ }^\circ\text{C}$, o un líquido combustible clase II cuya temperatura de inflamación igual o mayor a $37.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ($100 \text{ }^\circ\text{F}$), pero menor a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ($140 \text{ }^\circ\text{F}$) y su punto de ebullición es menor a $37.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ($100 \text{ }^\circ\text{F}$), también conforme a la NRF-016-PEMEX-2010. Al calentarse el reactor formaría una nube de vapor flamable y se muestran en la figura 4-5.

4.6. Señalamiento de las medidas de seguridad y preventivas en materia ambiental

Se deben utilizar programas de entrenamiento del personal de la planta para el manejo de la planta en condiciones normales de operación, las condiciones de falla, las condiciones de emergencia y las liberaciones accidentales. Los programas deben incluir instrucciones escritas, instrucciones para ser impartidas en clases y prácticas de campo. Revisiones periódicas y ejercicios deben formar parte de los programas prácticos. Se deben proveer a los empleados de materiales impresos que describan los estándares y procedimientos de emergencia y deben ser revisados como sea necesario para que sean consistentes con prácticas aprobadas y con modificaciones recientes de la planta.

Se debe utilizar un programa de prevención y protección contra incendios para toda la planta. Todo el personal de operación de la planta debe estar capacitado en cuanto a la prevención contra incendios y las actividades a desarrollar en caso de incendio. Todo el personal de la instalación debe ser capacitado en primeros auxilios y el empleo de extinguidores.

La formación y el entrenamiento de los equipos especializados contra incendios y los equipos de primeros auxilios deben estar de acuerdo con o exceder como mínimo los requerimientos especificados. Todos los planes de protección y prevención contra incendios deben ser periódicamente revisados y las estrategias de entrenamiento soportadas.

El operador de una instalación debe formular un plan de contingencias para manejar los desastres mayores en la planta. Todo el personal de la instalación debe estar entrenado para participar en planes para el control de emergencias en las instalaciones relacionadas con liberaciones accidentales incluyendo emergencias como tormentas, temblores, inundaciones, fallas en el suministro de energía, incendios, explosiones y liberaciones accidentales de químicos peligrosos.

El plan de contingencias debe describir la coordinación entre la planta y la policía local, bomberos, y demás personal de emergencias. El plan debe ser específico en la designación de responsabilidades y en el establecimiento de situaciones específicas de alto riesgo que sean posibles en la planta. Los procedimientos y responsabilidades de comunicación para la transmisión de información durante la emergencia deben estar claramente definidos. El plan debe incluir procedimientos para la notificación de emergencias a la comunidad y a los gobiernos locales. Cuando una liberación accidental pueda afectar de manera adversa a una comunidad local, el plan debe incluir procedimientos adecuados de respuesta en emergencias de la comunidad.

Se deben llevar a cabo regularmente simulacros de emergencias que involucren al personal de la planta. También se deben desarrollar periódicamente ejercicios de desastre que incorporen organizaciones de respuestas locales en emergencias. Estos ejercicios pueden incluir simulaciones durante emergencias de operación, ejercicios de disciplina, y ejercicios de campo.

Se debe considerar un programa de prueba, inspección y de monitoreo para el equipo de proceso e instrumentación por áreas de alto potencial de riesgo. Los sistemas y componentes a los cuales estos programas pueden ser aplicados incluyen, sin estar limitadas, lo siguiente: recipientes sujetos a presión; dispositivos y sistemas de escape; instrumentos de proceso crítico; llaves de seguridad en proceso; aislantes, depósitos, válvulas de desagüe; sistemas de tuberías de proceso; sistemas de tierras eléctricas y depósitos; sistemas de protección contra incendios; y alarma de emergencia y sistemas de comunicación. Se debe disponer de dibujos de ingeniería y especificaciones de diseño para inspección.

La construcción de diques de contención para derrames y emergencias, señales y lavadores para liberaciones de químicos, son ejemplos de tecnologías de protección.

Rociadores de agua o cortinas de vapor para la dilución y dispersión, barreras para la diversificación y dispersión, y procedimientos como compuertas, ventanas, refugios en lugares y evacuación en las áreas afectadas. La mitigación pretende controlar una liberación después de que las medidas de prevención y protección hayan fallado.

Una vez que un incendio ha comenzado en o cercano a un proceso que involucre químicos tóxicos, el control del incendio se vuelve una preocupación primordial. El diseño de consideraciones para la protección contra incendios se basa en la remoción de combustible, oxígeno o calor provenientes del incendio. La adecuación y seguridad del suministro de agua, las posibles medidas para combatir el incendio de productos químicos, y un equipo adecuado para este combate son las primeras consideraciones del diseño de procesos para la protección contra incendios a través de una prevención inicial de incendios a través de un cuidadoso diseño de procesos.

La instalación de los extintores portátiles y carretilla de polvo químico seco (PQS) y portátiles de bióxido de carbono (CO₂), deberán colocarse distribuidos estratégicamente en el centro de trabajo, de acuerdo con las especificaciones indicadas en la norma NOM-002-STPS-2010.

Los equipos deberán presentar identificación, fechas de última inspección y recarga, estar en buenas condiciones físicas exteriores, tanto en el cuerpo como en sus accesorios, altura máxima de instalación, distancias entre ellos, señalización y libres de obstáculos para su acceso.

La instalación debe contar con detectores de incendio acordes al grado de riesgo de incendio en las distintas áreas del centro de trabajo, para advertir al personal que se produjo un incendio o que se presentó alguna otra emergencia.

El sistema de detección de incendio incluye tableros de control de fuego principal y local, detector de calor, detectores de humo estaciones manuales y alarmas. Se tendrán programas de mantenimiento preventivo para todos los equipos de la instalación, en especial para las líneas de gas natural y sus accesorios. Dependiendo de la naturaleza del equipo o accesorio, se programarán para cada 4 000, 8 000, 12 000, 16 000 y 20 000 h de operación.

4.7. Recomendaciones técnico-operativas

Para un sistema de control efectivo las dinámicas de procesos deben de estar propiamente consideradas y el sistema de control debe ser compatible con las habilidades y conocimientos del personal de operación y mantenimiento. Las medidas tecnológicas específicas de prevención en todos los sistemas de control incluyen la utilización de componentes de control de mayor seguridad, exactitud y mejores tiempos de respuesta. Un principio fundamental de los componentes de sistemas de control es la redundancia, o el uso de un respaldo independiente a los componentes críticos. La clave aquí es la independencia para evitar un modo común de falla en los sistemas críticos. Para un proceso específico, la reducción de la probabilidad o magnitud de las desviaciones del proceso o fallas que puedan llevarnos hacia un accidente pueden involucrarse en cambios en el diseño en un sistema de control que va desde los componentes individuales a través de una estrategia de control y hardware.

La cimentación debe asegurar la estabilidad de todos los recipientes y el equipo fijo que contenga químicos peligrosos. Como requisito mínimo, el diseño debe estar de acuerdo con los estándares reconocidos de construcción y especificaciones del material en la industria.

El diseño debe considerar todas las condiciones normales y anormales de carga y vibraciones, así como condiciones severas causadas por congelamiento, incendio, viento, temblores, inundaciones, o deslaves. El equipo móvil debe ser seguro para prevenir fallas o accidentes en las líneas de proceso que transponen químicos peligrosos durante la operación y no deberán utilizarse para reemplazar permanentemente una pieza estacionaria del equipo a menos que una situación dada dicte una preferencia o la necesidad para que este equipo móvil se necesite desde un punto de vista de seguridad.

Las estructuras de acero deben, como mínimo, ser diseñadas y construidas de acuerdo con los estándares de construcción apropiados y las especificaciones del material en la industria. El diseño debe considerar todas las cargas muertas normales y anormales y las cargas dinámicas resultantes del viento, colisión, temblores, u otras fuerzas externas. Como mínimo, las instalaciones a prueba de fuego deben utilizarse en las áreas donde los químicos peligrosos sean manufacturados, almacenados, manejados, o generados y además estas áreas deben estar de acuerdo con los códigos y estándares aplicables. La protección contra incendios más allá de los estándares mínimos deberá considerarse para áreas peligrosas en donde los productos químicos peligrosos están presentes.

Todos los recipientes sujetos a presión y las cubiertas de los recipientes deben estar adaptados con válvulas de escape de presión y vacío. El sistema de escape debe estar diseñado de acuerdo a los procedimientos de diseño reconocidos y los estándares apropiados en la industria como mínimo. Los procedimientos estrictos y los estándares algunas veces pueden ser adecuados.

Los sistemas de contención deben ser diseñados de acuerdo a los procedimientos de diseño reconocidos para los sistemas de contención. Las válvulas de corriente y presión alta y los dispositivos de escape por medio de vaciado, deberán presentarse estando cerradas de manera que el recipiente se encuentre aislado de cualquier liberación de presión o de vacío.

Donde un sistema viajero de presión debe ser utilizado con un sistema de liberación de presión. Esto ayuda a minimizar la frecuencia de liberaciones de químicos peligrosos a través de un sistema de liberación de presión. Todos los dispositivos de liberación de presión y vacío se deben inspeccionar y mantener periódicamente como parte de una rutina de mantenimiento. Cuando se encuentre corrosión, impurezas o escamas, se deben elaborar pruebas de capacidad.

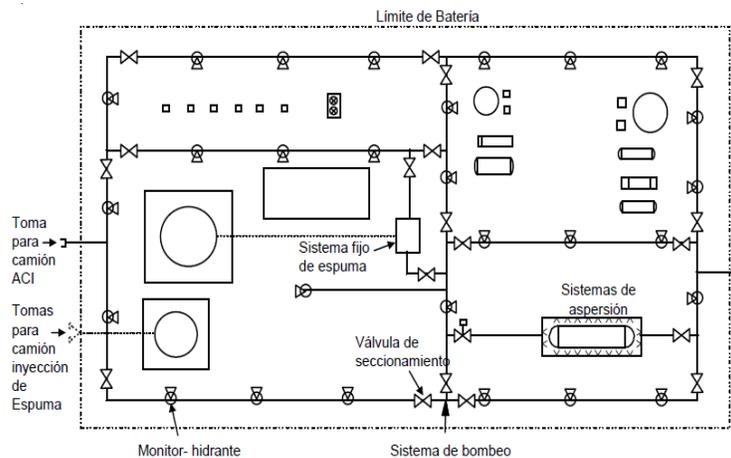
Los dispersores de agua y las cortinas de vapor son métodos utilizados para aumentar la tasa de dispersión del químico liberado, desviar su dirección, servir como barrera entre la nube tóxica o pluma y los receptores potenciales, e inclusive absorber el químico. La aplicabilidad y efectividad de estos métodos dependen de la naturaleza de su liberación, de las propiedades del químico específico y de la capacidad de extenderse al punto efectivo más alto de una liberación. La efectividad también dependerá de las condiciones meteorológicas en el tiempo que los métodos de mitigación se aplican.

Para el diseño de la red de agua contraincendio, se debe considerar la demanda de agua para atender el riesgo mayor en el sitio donde ocurre este evento; considerando esta premisa en los cálculos hidráulicos del sistema, manteniendo la presión en el punto de descarga más desfavorable hidráulicamente de 689 kPa (7 kg/cm²; 100 lb/in²), así mismo se tome en cuenta el conjunto de dispositivos y tubería para formar anillos o circuitos para suministro de agua a los hidrantes, monitores, sistemas de aspersores, rociadores y sistemas de generación de espuma.

El diseño no debe considerar el uso de válvulas de globo en redes de agua contraincendio, debido a que provocan excesivas caídas de presión, a excepción del cabezal de pruebas. Todas las válvulas instaladas en la red contraincendio, deben estar listadas y aprobadas por el Organismo certificador de pruebas (Underwriters Laboratories, UL), la Asociación Mutualista de Reaseguradores (Factory Mutual, FM) o equivalente, para servicio contraincendio.

Los anillos de la red de agua contraincendio deben diseñarse para instalarse en cada uno de estos un máximo de 12 hidrantes-monitores. La red de agua contraincendio debe contar válvulas de seccionamiento, tomas para camión, tomas para monitores-hidrantes, tomas de alimentación a sistemas de aspersión, tomas de alimentación a sistemas de espuma, como se muestra en la figura 4-6. No podrán tenerse tomas exclusivas para hidrantes, invariablemente deben ser monitor hidrante. Todos los sistemas de rociadores espuma-agua deben estar provistos de una purga de cuando menos de 25,4 mm (1 in) que garantice el vaciado total del sistema, así como un filtro tipo "Y" a la entrada de la tubería de alimentación que no permita el paso de partículas mayores de 9,52 mm (3/8 de in).

Figura 4-6. Diagrama de una red de agua contra incendio.



Fuente: NRF-016-PEMEX-2010.

Las densidades mínimas de aplicación de espuma, según el área o equipo a proteger deben ser como mínimo con lo indicado en la Tabla 4-9 y conforme a lo indicado en el capítulo 4 de la NFPA 11 edición 2005 o equivalente en su última edición.

Tabla 4-9. Densidades mínimas de aplicación de espuma.

Área o equipo a proteger	Densidad de aplicación (GPM /ft ²)	Densidad de aplicación (LPM /m ²)	Equipos o descarga y tiempos mínimos de aplicación
Tanques atmosféricos verticales techo fijo, con hidrocarburos líquidos combustibles o inflamables no polares.	0.1 mínimo	4.1 mínimo	Cámaras de espuma tipo II para aplicación superficial Formadores de alta contrapresión para aplicación sub-superficial. 60 min.
Tanques atmosféricos verticales techo fijo, con hidrocarburos líquidos combustibles o inflamables polares.	0.1 mínimo	4.1 mínimo	Cámaras de espuma tipo II para aplicación superficial 60 min.
Tanques atmosféricos verticales cúpula flotante, con hidrocarburos líquidos combustibles o inflamables	0.3 mínimo	12.2 mínimo	Cámaras de espuma tipo II para aplicación superficial 25 min.
Llenadoras de auto y carro-tanques	0.16	6.5	Sistemas de rociadores o monitores con bombillas agua-espuma 20 min.

Fuente: NRF-016-PEMEX-2010.

CONCLUSIONES

Al realizar esta tesis; me eh llevado la experiencia de poder aplicar el conocimiento adquirido a lo largo de la carrera de Ingeniería Química, principalmente en ver la importancia del tema, que en México se gestione más los estudios de riesgo en las industrias, para el cuidado del medio ambiente y se pueda evitar otra catástrofe como lo que ocurrió en el río Sonora.

Existen en el mercado una gran variedad de metodologías para el análisis de riesgos, y el uso de ellas debe ser selectivo con el fin de optimizar sus resultados. Antes de aplicar un método en particular, se deberán analizar sus ventajas y desventajas, preguntándose invariablemente si nos dará las respuestas esperadas, en función de la profundidad del estudio, tiempo, costo y aplicabilidad de resultados.

Si bien, la premisa es garantizar la mejor protección al ser humano, a las comunidades y al medio ambiente, el costo de las medidas para lograrlo afectará los costos de producción, por lo que se requiere de una alta creatividad en la propuesta de soluciones para lograr el balance óptimo entre el costo del control y la efectividad en la eliminación o reducción de los riesgos.

Desarrollar el método de análisis de riesgo y operabilidad (HAZOP), es una gran herramienta para el Ingeniero Químico, ya que le permite; Identificar un posible riesgo asociado con un proceso o actividad planificada o existente, mejorar las condiciones de diseño y operación, la predicción de las áreas afectadas con los efectos en la salud y el medio ambiente para así poder estimar la gravedad de las consecuencias de cualquier liberación en las áreas afectadas.

Para realizar un estudio HAZOP; se requiere de información detallada con respecto al diseño y operación de un proceso; por lo que utilizar la tecnología y realizar una simulación; como con el programa PRO II, permite saber sus condiciones de operación y así realizar recomendaciones de diseño o de procedimiento, para mejorar el sistema.

Mediante el diagrama de la tubería e instrumentación, identifique y evalué los puntos críticos de las causas y consecuencias potenciales, que derivo a que el análisis HAZOP mostrará 7 eventos de categoría II (indeseables), de los cuales consiste en la ruptura total de la tubería que contiene ácido sulfúrico, que representaría un desastre ecológico y destructivo para cualquier ser vivo que este expuesto, y la liberación masiva del reactor por golpe externo, que son casos que podrían llegar a pasar no más de una vez en la vida de la instalación pero su consideración no se pueden dejar de lado.

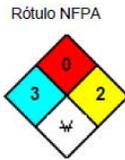
Mediante el programa ALOHA pude determinar las distancias de seguridad y de riesgo para las instalaciones, el personal, la población o los bienes personales, con el fin de disminuir las afectaciones potenciales, producidos por el derrame de ácido sulfúrico y con esto establecer las medidas preventivas y correctivas para establecer las políticas que eviten la coexistencia de zonas urbanas o ecológicamente sensibles, áreas industriales de alto riesgo para efectos de prevenir daños de consideración en el caso de presentarse emergencias ambientales.

Se determinó que la construcción de una planta piloto de alquilación en México puede ser factible, en primera instancia por su operabilidad y por los productos que se obtienen; como el alquilado, que al mezclarlo con la gasolina signifique tener un mejor producto con un alto octanaje y menor contenido en aromáticos y en segunda instancia por los casos evaluados de fuga son aceptables, cumpliendo con los programas de mantenimiento correctivo y preventivo, realizando inspecciones y mediciones periódicas a las instalaciones.

ANEXOS

ANEXO 1

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD
ÁCIDO SULFÚRICO



Salud: 3
Inflamabilidad: 0
Reactividad: 2
Especiales: 4(w)



Marca en etiqueta : **TOXICO**

Clasificación de riesgos del producto químico:

Salud: 3

Inflamabilidad: 4

Reactividad: 0

a) **Riesgos para la salud de las personas:** Los vapores son tóxicos al ser inhalados. Efectos agudos en sistema respiratorio son (de menor a mayor):

- Rinitis (inflamación de narices) con pérdida del sentido del olfato.
- Traqueobronquitis con dolor.
- Producción de esputos, tos, dolor pulmón.
- Parálisis respiratoria y asfixia terminal con convulsiones.

Concentración:

Baja concentración

< 1 ppm

De 3 a 5 ppm

> 5 ppm

10 a 20 ppm

> 20 ppm

Efectos:

Conjuntivitis hasta queratitis en el caso más grave.

Puede ocurrir detección inicial del gas por el olor.

El olor se vuelve molesto.

Ocurre la fatiga olfativa y se deja de oler.

El segundo aviso es la irritación del ojo.

Irritación de las vías respiratorias y ojos, junto con malestares estomacales y desórdenes del sistema nervioso, Mayor concentración, aceleración del ritmo respiratorio, seguida de inconsciencia, parálisis respiratoria y la muerte.

Todos estos efectos pueden resultar sin aviso debido a la fatiga olfativa.

Efectos de una sobreexposición aguda (por una vez):

Inhalación : Es la vía más importante de ingreso del gas al organismo.

Contacto con la piel : Tiene poca importancia como vía de ingreso aún a altas concentraciones.

Contacto con los ojos : Puede producir desde conjuntivitis hasta queratitis de la córnea.

Ingestión : Es irrelevante como ruta probable de exposición.

Efectos de una sobreexposición crónica (largo plazo): No se han reportado efectos de este tipo debido a que el organismo rechaza el contacto prolongado con este tóxico.

Condiciones médicas que se verán agravadas con la exposición al producto: El alcohol en la sangre acentúa los efectos de una sobreexposición al ácido sulfhídrico. Aún habiendo ingerido alcohol 24 horas antes se ha observado una agudización de los efectos.

b) **Riesgos para el medio ambiente:** No hay datos disponibles al efecto, pero es razonable suponer una toxicidad alta en caso de entrar el producto en fuentes de agua potable.

c) **Riesgos especiales de la sustancia:** El producto une su toxicidad con alta inflamabilidad, lo que obliga a tomar precauciones especiales al trabajar con él.

Sección 4: Medidas de primeros auxilios

En caso de contacto accidental con el producto, proceder de acuerdo con:

Inhalación : Retire a la víctima al aire libre. Ayude a la respiración, si ello es necesario. **Consulte un médico de inmediato.**

Contacto con la piel : Lave con agua y jabón la zona afectada.

Contacto con los ojos : Lave con abundante agua a lo menos por 15 minutos.

Consiga ayuda médica.

Ingestión : No tiene importancia como ruta de exposición.

Notas para el médico tratante: El ácido sulfhídrico se combina con fuerza con la methemo- globina, en una forma similar al cianuro. Una dosis de nitrito de sodio (300 mg) para un adulto produciría methemoglobina en la sangre, lo que inactivaría en parte a este veneno.

Sección 5: Medidas para lucha contra el fuego

Agentes de extinción: Use polvo químico seco. Detenga el flujo de gas.

Procedimientos especiales para combatir el fuego: Use los procedimientos normales para extinguir un fuego de un gas.

Equipos de protección personal para el combate del fuego: Debe usarse equipo de protección respiratoria autónoma, con protección facial completa.

Sección 6: Medidas para controlar derrames o fugas

Medidas de emergencia a tomar si hay derrame de material: Despeje el área en un radio de a lo menos 50 m del punto de derrame. Puede ser necesaria una distancia mayor, según las condiciones presentes en el lugar. Al área debe entrarse sólo con protección respiratoria completa. Localice la fuga con indicadores de acetato de plomo o con instrumentos especiales. Al trabajar en la fuga, quienes lo hagan deben tener el viento en su espalda.

Equipo de protección para atacar la emergencia: Protección respiratoria completa; traje de protección química y guantes de neopreno. Si la emergencia involucra líquidos, botas de neopreno.

Precauciones a tomar para evitar daños al medio ambiente: Trate de parar la fuga lo más pronto posible. Si ello no se puede, dirija los gases a una solución de 20 a 25% de soda cáustica, donde absorberlos.

Métodos de limpieza: La dilución con abundante cantidad de agua es un método adecuado.

Método de eliminación de desechos: Si ello es posible, incinere los restos de productos que hayan estado en contacto con el ácido sulfhídrico.

Sección 7: Manipulación y almacenamiento

Recomendaciones técnicas: Debido a la peligrosidad del ácido sulfhídrico, hay que tratar de no entrar en contacto con él. Si ello no es posible, hay que protegerse totalmente antes de entrar a la atmósfera contaminada.

Precauciones a tomar: Almacene lejos de agentes oxidantes fuertes. Aparte las fuentes de ignición. Almacene en áreas ventiladas. Evite todo contacto con el gas.

Condiciones de almacenamiento: Almacene en áreas ventiladas, frías. Almacene lejos de agentes oxidantes fuertes. No aspire el gas. Puede ser fatal.

Embalajes recomendados y no adecuados por el proveedor: No debe entrar en contacto con metales que tengan cobre o zinc en su composición.

Sección 8: Control de exposición/protección ambiental

Medidas para reducir la posibilidad de exposición: En los lugares en que exista la posibilidad de contacto con ácido sulfhídrico la ventilación debe ser muy buena, ya sea natural o forzada.

Límite permisible ponderado (LPP), absoluto (LPA) y temporal (LPT):

Límite permisible ponderado: 8 ppm o 11,2 mg/m³

Límite permisible temporal : 15ppm o 21 mg/m³.

Protección respiratoria : Use máscara con línea de aire o equipo de protección autónoma.

Guantes de protección : Use guantes de neopreno, de puño largo.

Protección de la vista : Use la máscara de protección completa, con provisión de aire.

Otros equipos de protección: Prevenga el contacto accidental con la piel: si es necesario use trajes químicos y botas de neopreno.

Ventilación : Los recintos en que se pueda generar ácido sulfhídrico deben tener buena ventilación, ya sea natural o forzada.

Sección 9: Propiedades físicas y químicas

Estado físico : Gas.

Apariencia y olor : Incoloro, de fuerte olor a huevos podridos pero inodoro a concentraciones tóxicas.

PH : Acido.

Temperaturas específicas y/o intervalos de temperatura: Datos no disponible

Punto de inflamación : No es pertinente.

Límites de inflamabilidad : Datos no disponibles

Temperatura de autoignición : 260°C.

Peligros de fuego o explosión: Se enciende en contacto con óxidos metálicos y con oxidantes fuertes. Reacciona vigorosamente con polvos metálicos.

Presión de vapor a 20°C : Gas.

Densidad de vapor : 1,189.

Solubilidad en agua y otros solventes: 0,33% en peso en agua, a 25°C y 760 mm Hg.

Sección 10: Estabilidad y reactividad

Estabilidad: Estable.

Condiciones que se deben evitar: Evite el contacto directo con fuentes de ignición. Evite exponer el producto al calor del sol. No coma, beba o fume en el área de trabajo.

Incompatibilidad (materiales que se deben evitar): Evite el contacto con óxidos metálicos y oxidantes fuertes.

Productos peligrosos de la descomposición: No descompone.

Productos peligrosos de la combustión: Forma humos peligrosos de SOx.

Polimerización peligrosa: No ocurrirá.

Sección 11: Información toxicológica

Toxicidad a corto plazo	: A 300 ppm es fatal para el ser humano.
Toxicidad a largo plazo	: No se conoce.
Efectos locales y sistémicos	: Es irritante para los ojos.
Sensibilización alérgica	: No ocurre.

Sección 12: Información ecológica

Inestabilidad	: No hay datos disponibles.
Persistencia/Degradabilidad	: No hay datos disponibles.
Bio-acumulación	: No se produce.
Efectos sobre el medio ambiente	: Es dañino para la vida acuática en concentraciones muy bajas.
Puede ser peligroso si llega a las fuentes de agua potable.	

Sección 13: Consideraciones sobre disposición final

Métodos recomendados y aprobados por la normativa chilena para disponer de la sustancia, residuos, desechos: Se recomienda la incineración de los residuos contaminados. Esta incineración debe hacerse en una instalación especialmente diseñada para la eliminación de residuos químicos.

Métodos recomendados y aprobados por la normativa chilena para la eliminación de envases / embalajes contaminados: El mismo tratamiento debe aplicarse a los envases contaminados con el producto.

Sección 14: Información sobre transporte

Terrestre por carretera o ferrocarril	: CLASE 2.3, NU 1053
Vía marítima	: CLASE 2.3, NU 1053
Vía aérea	: CLASE 2.3, NU 1053
Vía fluvial / lacustre	: CLASE 2.3, NU 1053
Distintivos aplicables NCh 2190	: TÓXICOS
No. NU	: 1053.

Sección 15: Normas vigentes

Normas internacionales aplicables	: IMO / NU. Clase 2.3 / 1053.
Normas nacionales aplicables	: N Ch 382; N Ch 2190; D. S. 298; D. S. 148
Marca en etiqueta	: <u>TÓXICO</u>

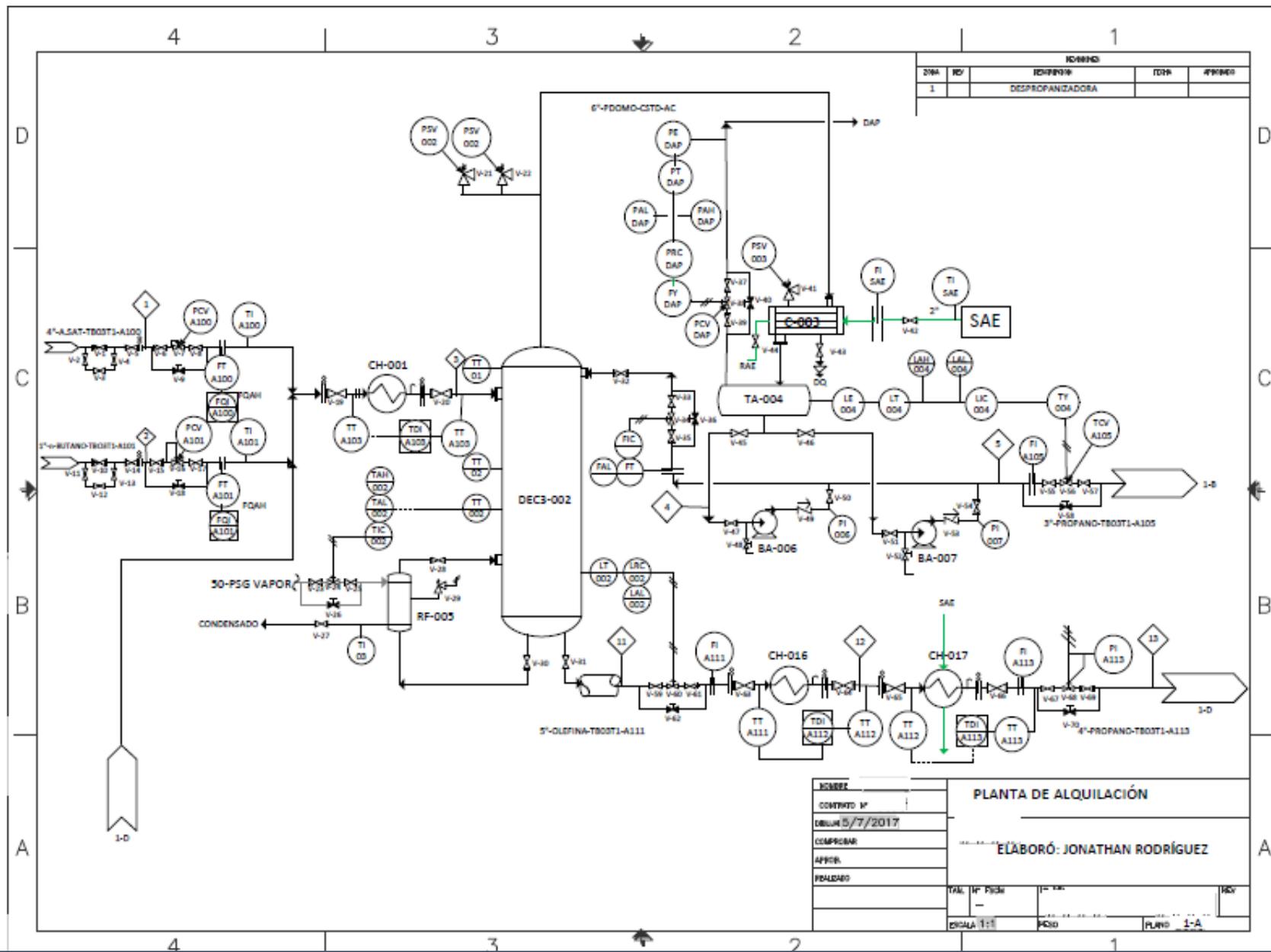
Sección 16: Otras informaciones

No hay.

Los datos consignados en esta Hoja de Datos fueron obtenidos de fuentes confiables. Sin embargo, se entregan sin garantía expresa o implícita respecto de su exactitud o corrección. Las opiniones expresadas en este formulario son las de profesionales capacitados de OXIQUM S.A. La información que se entrega en él es la conocida actualmente sobre la materia.

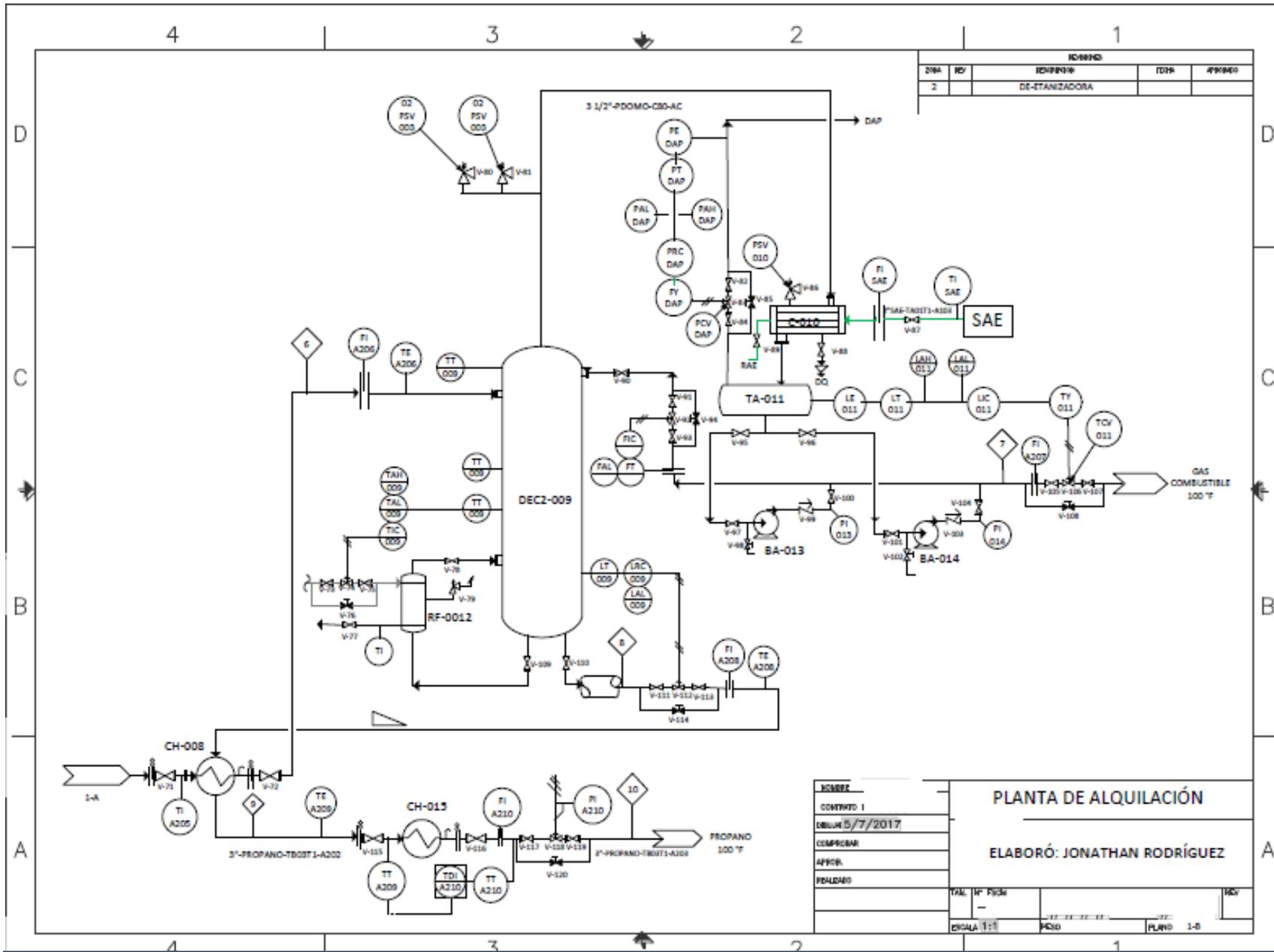
Considerando que el uso de esta información y de los productos está fuera del control de OXIQUM S.A., la empresa no asume responsabilidad alguna por este concepto. Determinar las condiciones de uso seguro del producto es obligación del usuario.

ANEXO 2



ID: 0000			
204	ID	IDP	PRIME
1		DESPROPANIZADORA	

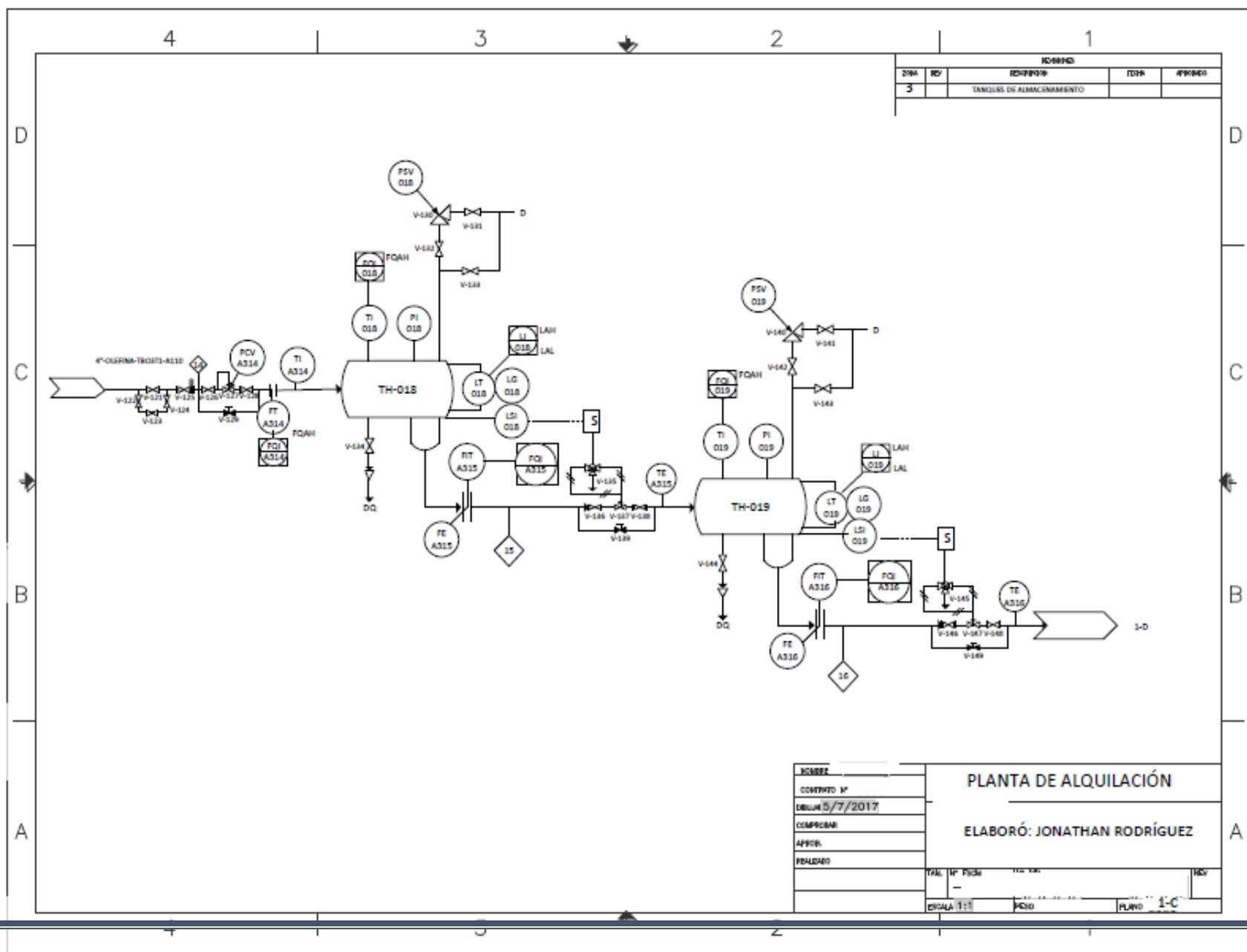
NOMBRE: _____ CONTRATO N°: _____ DEL: 05/7/2017 COMPROMISO: _____ APROB.: _____ FECHA: _____		PLANTA DE ALQUILACIÓN ELABORÓ: JONATHAN RODRÍGUEZ	
TAL: []	REV: []	ESCALA: 1:1	PLANTA: 1-A



ID: 0000				
DNA	ID	ID: 0000	ID: 0000	ID: 0000
2		DE-ETANIZADORA		

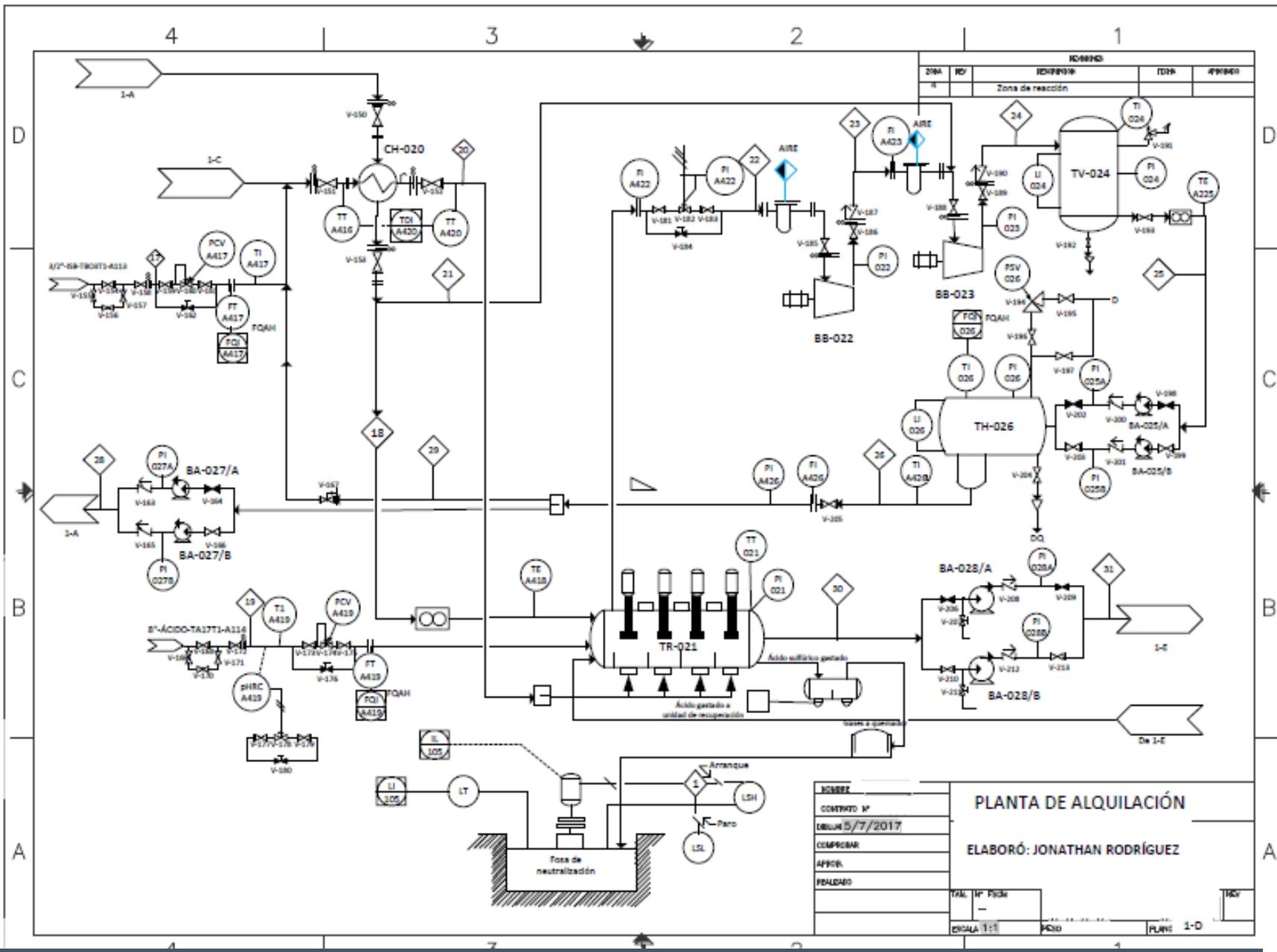
ISSUE	
CONTENIDO	1
FECHA	5/7/2017
COMPROBADO	
APROBADO	
ELABORADO	

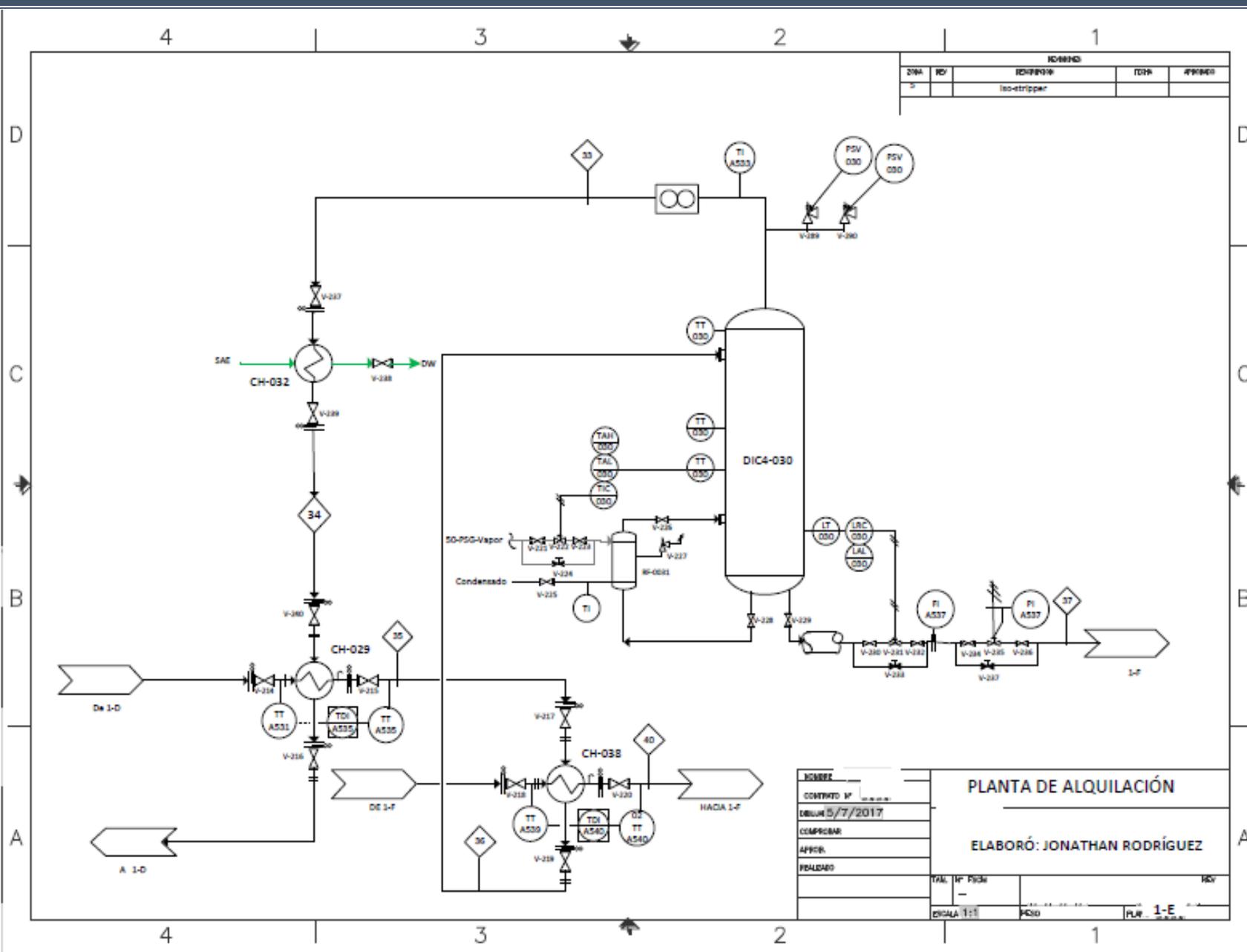
PLANTA DE ALQUILACIÓN		
ELABORÓ: JONATHAN RODRÍGUEZ		
TAL. Nº	PSIG	REV
ESCALA	1:1	PLANO
	PSIG	1-6



IDENTIFICACION				
OPERA	NO	DESCRIPCION	FECHA	PROYECTO
3		TANQUES DE ALMACENAMIENTO		

DISEÑADOR COMPROBADO DIBUJADO 5/7/2017 COMPROBADO APROBADO FEALBADO	PLANTA DE ALQUILACION ELABORÓ: JONATHAN RODRIGUEZ
TAL. N° PICH	REV
ESCALA 1:1	PLANO 1-C





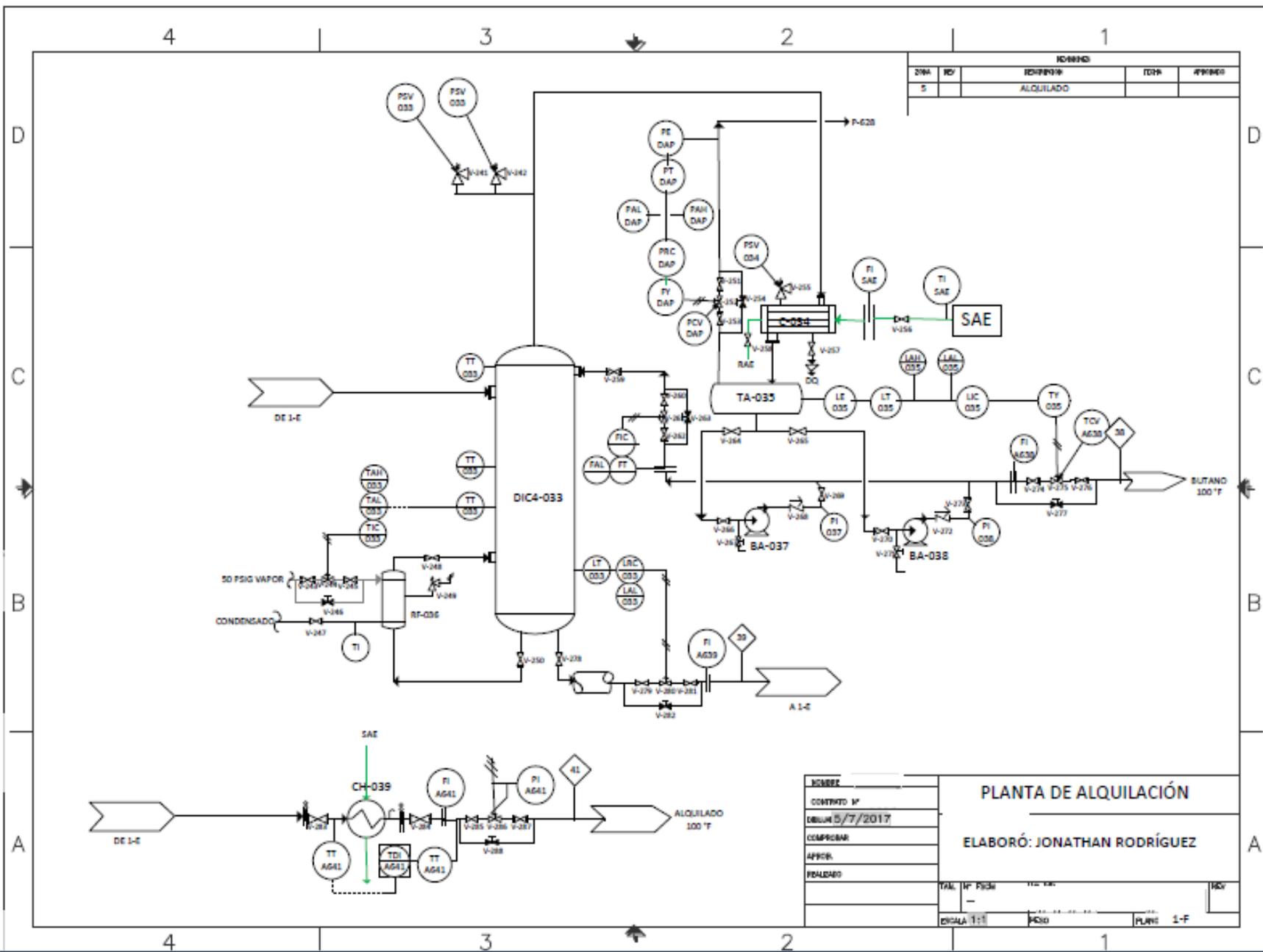
IC-1893				
DNA	REV	IC-1893-01	DTM	PRMBO
1		iso-tripper		

CONTRATO N°	
FECHA 5/7/2017	
COMPROBAR	
APROB.	
REALIZADO	

PLANTA DE ALQUILACIÓN

ELABORÓ: JONATHAN RODRÍGUEZ

TAL N° P336	REV
-	
ESCALA 1:1	PLN. 1-E



ID: 0000				
DATA	REV	DESCRIPCIÓN	TDIA	PROYECTO
5		ALQUILADO		

NOMBRE	
CONTROL N°	
DEBIDA 5/7/2017	
COMPROBAR	
APROB.	
REALIZADO	

PLANTA DE ALQUILACIÓN	
ELABORÓ: JONATHAN RODRÍGUEZ	
TAL. N° PISO	
ESCALA	1-F

REFERENCIAS

- API. (1987), Technical Data Book-Petroleum Refining, Volume 1.
- Bosch, W.W. (1992). Identify, screen, & rank toxic chemicals. Chemical Engineering Progress.
- Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers (1992). Guidelines for Hazard Evaluation Procedures. New York, NY.
- CCPs, (1995). JBF Associates, Inc., Knoxville, TN
- Chapin, L.E., Liolios, G.C. & Robertson, T.M. (1985), Which Alkylation-hydrofluoric acid or sulfuric acid? Hydrocarbon Processing, International.
- Chemical Industry Safety and Health Council, 1977/3. Hazard and operability Studies detailed sequence of examination.
- Consejo Mayor Industrial de Canadá (1994). Hazardous substances risk assessment: a mini-guide for municipalities and industry.
- Displaying an ALOHA Threat Zone in MARPLOT.
file:///C:/Program%20Files/ALOHA/AlohaHelp/aloha_help.htm#t=CameoSuite%2FWorking_with_MARPLOT.htm&rhsearch=bleve_threat_zone&rhhlterm=bleve_threat_zone&rhshns=%20.
- Elsevier (2015). Prevención de Pérdidas en industrias de Procesos. USA. Volumen 2.
- Gary, J.H. & Handwerk, G.E. (1984). Petroleum Refining Technology and Economics. Marcel Dekker. New York.
- ILO/UNEP/WHO International Programmed on Chemical Safety, 1988. Major hazard control. A practical manual. Ginebra.
- Instituto Americano de Ingenieros Químicos (1992), Lineamientos para los procedimientos de evaluación de peligros.
- JBF Associates, Inc., Knoxville, TN, 1990. Technical Specifications for Performing a HAZOP Analysis.
- KLETZ, T.A. (1985), Elimination Potential process hazards. Chemical Engineering.
- Kranz, K., and Graves, D. (1988). Olefin interaction in sulfuric acid catalyzed alkylation. 215th National Meeting, American Chemical Society (Division of Petroleum Chemistry), Dallas, TX.
- Lawley, H.G. (1974). Operability studies and hazard analysis, Chemical Engineering Process, Vol. 70, No.4.
- Lee, L. & Harriott, P. (1977). The Kinetics of Isobutane Alkylation in Sulfuric Acid. I&EC Process Design Dev.
- Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, 1988.
- M. A. Fahim; Taher A Alsahhaf & Amal Sayed Elkilani, 2010. Fundamentals of petroleum refining, Amsterdam; Boston: Elsevier.

-
- Masters, K.R. (1991). Alkylation's Role in Reformulated Gasoline. National Conference on Octane Quality and Reformulated Gasoline.
 - M. G. Gressel & J. H. Gideon (1991). *An Overview of Process Hazard Evaluation Techniques*, American Industrial Hygiene Association Journal, Vol. 52, No. 4.
 - Meyer, D.W., Chapin, L.E. & Muir, R.F. (1983). Cost Benefits of Sulfuric Acid Alkylation.
 - NFPA 704, (1989). Identification of the Fire Hazards of Materials, National Fire Protection Association, Quincy, MA.
 - NFPA 921 (2008). Guía para investigaciones de fuego y Explosiones. USA.
 - NFR-010-PEMEX-2014. Espaciamientos mínimos y criterios para la distribución de instalaciones industriales.
 - NFR-016-PEMEX-2012. Diseño de Redes Contra incendios.
 - NFR-018-PEMEX-2007. Estudios de riesgo.
 - NFR-032-PEMEX-2012. Sistemas de tubería en plantas industriales – diseño y especificaciones de materiales
 - NOM-002-STPS-2010. Condiciones de seguridad. Prevención y protección contra incendios en los centros de trabajo.
 - Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Actividades Altamente Riesgosas.
 - SimSci-Esscor (2013). PRO II 9.2. Sulfuric Acid Alkylation Casebook.
 - Soave, G. (1972). *Equilibrium Constants from a Modified Redlich-Kwong Equation of States*. Chemical Engineering Sci. V. 27, Issue 6.
 - Unzelman, G.H. (1991), *U.S. Clean Air Act Expands Role for Oxygenates*, Oil & Gas Journal, April 15, Vol. 89, pg. 44-48, 5p.