

**Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas
Dpto. De Química**



TRABAJO DE DIPLOMA

Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico.

Título: Evaluación del riesgo por incendio, explosión y toxicidad en los tanques de almacenamiento y tratamiento de la Planta de Procesamiento de Crudos

Autor: Ismalvys Hoyos Quiñones

Tutor: Dr.C. Yoney López Hervis

**Matanzas, Cuba
2020**

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, Ismalvys Hoyos Quiñones, declaro ser la única autora de este Trabajo de Diploma y lo pongo a disposición de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP-Centro) y de la Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, para hacer uso del mismo con el objetivo y finalidad que se estime conveniente.

Ismalvys Hoyos Quiñones

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Tribunal

Miembro del Tribunal

Miembro del Tribunal

*“Establecer metas es el primer paso en
volver lo invisible en visible”*

Anthony Robbins

DEDICATORIA

Esta tesis es mi mayor logro y va dedicada especialmente:

- ✓ *A mis padres por ser mi motor impulsor en la vida, mi inspiración y mi sostén.*
- ✓ *A mis abuelos maternos por ser mis segundos padres, por ser la razón de mi vida.*
- ✓ *A mi novio por contar con su amor, apoyo y dedicación en todo momento.*
- ✓ *A mi abuelo Cayo que comenzó este sueño junto a mí pero desafortunadamente no pudo ver la culminación.*
- ✓ *A mi tío Ariel por su apoyo y cariño.*
- ✓ *A todos mis amigos y familiares que siempre creyeron en mí.*

AGRADECIMIENTOS

- ✓ *A mamá y papí porque estoy profundamente agradecida de la educación que de ellos he recibido a lo largo de mi vida y porque estoy convencida que gracias a todo su infinito amor, apoyo y sacrificio hoy puedo cumplir mi sueño y sentirme tan feliz.*
- ✓ *A míma y a mi abuelo Cuco por darme su eterno amor y cariño, por siempre estar para mí cuando los necesité y por siempre confiar en mí.*
- ✓ *A Luisito por su apoyo incondicional, su amor y su confianza, por hacerme saber que yo era alguien importante.*
- ✓ *A mi familia pero en especial a mi tío Ariel por siempre estar dispuesto a darme su apoyo cuando me fue necesario.*
- ✓ *A mi tutor Yoney por su esfuerzo y dedicación, por transmitirme su experiencia a través de la realización de este trabajo de diploma.*
- ✓ *A mis amigos de siempre y a los que conocí en esta nueva etapa de mi vida...*
- ✓ *A mis compañeros de carrera, especialmente a Licelis, Patry, Lissandra y Saíly.*
- ✓ *A todos los profesores que integran esta disciplina y que ayudaron a mi formación, gracias a su compromiso y rectitud, hoy ya podré ser una profesional.*
- ✓ *A todas las personas que de una forma u otra pusieron su granito de arena para que yo pudiera lograr mi sueño.*

A todos, muchas gracias.

Resumen

El presente trabajo de diploma tiene como objetivo principal determinar el riesgo por incendio, explosión y toxicidad en los tanques de almacenamiento y tratamiento de la Planta de Procesamiento de Crudo, perteneciente a la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP-Centro). Para ello se desarrollan las metodologías establecidas, en primer lugar por la compañía *DOW Chemicals* para evaluar el Índice de Fuego y Explosión (IFE) y la metodología propuesta por la compañía *Imperial Chemical Industries* (ICI) para evaluar el Índice de Incendio, Explosión y Toxicidad (Mond). De la aplicación de estos índices se obtiene como resultado que todos los índices calculados sin bonificación en el índice Mond, para todas las unidades de proceso se encuentran en la categoría máxima de riesgo y si se compara este, que sería el IFE equivalente que calcula Mond con el IFE que calcula el índice Dow, se obtiene que el primero muestra resultados que se clasifican en la categoría de muy catastróficos, mientras que el Dow da moderado debido a que no utilizan los mismos parámetros a la hora de calcular. También se obtiene que Los índices de Fuego (F), Explosión interna (E), Explosión Aérea (A) y el Factor Global de Riesgo (R) se reduzcan entre un 87 y 99%, de forma tal que no representan un peligro para la unidad ni amenaza para el personal que allí radica.

Abstract

The main objective of this diploma work is to determine the risk of fire, explosion and toxicity in the storage and treatment tanks of the Crude Oil Processing Plant, belonging to the Centro Oil Drilling and Extraction Company (EPEP-Centro). For this, the established methodologies are developed, firstly by the DOW Chemicals company to evaluate the Fire and Explosion Index (IFE) and the methodology proposed by the Imperial Chemical Industries company (ICI) to evaluate the Fire, Explosion and Toxicity Index. (Mond). From the application of these indices it is obtained as a result that all the indices calculated without bonus in the Mond index, for all the processing units are in the maximum risk category and if this is compared, which would be the equivalent IFE that Mond calculates With the IFE that calculates the Dow index, it is obtained that the first one shows results that are classified in the category of very catastrophic, while the Dow gives moderate because they do not use the same parameters when calculating. It is also obtained that the Fire (F), Internal Explosion (E), Aerial Explosion (A) and Global Risk Factor (R) indices are reduced between 87 and 99%, so that they do not represent a danger to the unit or threat to the personnel that reside there.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1: Análisis bibliográfico	3
1.1. Definiciones generales sobre riesgo, incendios, explosiones y toxicidad	3
1.1.1. Riesgo	3
1.1.2. Incendios	4
1.1.3. Explosiones.....	5
1.1.4. Toxicidad	6
1.2. Riesgos más comunes en la industria del petróleo en la manipulación, almacenamiento y transporte de combustibles	7
1.3 Análisis de riesgos industriales.....	9
1.4. Métodos generales de evaluación de riesgos en la industria de procesos químicos	9
1.4.1. Métodos Comparativos	11
1.4.2 Métodos generalizados	11
1.4.3. Índices de Riesgo	14
1.5. Conclusiones parciales	23
Capítulo 2: Materiales y métodos	24
2.1 Descripción del proceso tecnológico de producción de petróleo en la EPEP-Centro	24
2.2 Descripción de la metodología empleada para el cálculo del Índice de Incendio y Explosión (IFE) de DOW.....	26
2.3 Descripción de la metodología empleada para el cálculo del Índice de Incendio, Explosión y Toxicidad Mond de ICI.....	40
Capítulo 3: Análisis de resultados.....	49
3.1 Análisis y comparación de los resultados de los índices IFE de Dow y el MOND de ICI	49
3.2 Conclusiones parciales:	76
Conclusiones:	77
Recomendaciones:	78
Bibliografía:	79
Anexos:	84

Introducción

El desarrollo acelerado de la sociedad actual junto con el aumento de la población mundial trae consigo un aumento considerable del consumo de productos industriales y por ende de la demanda de energía. Dentro de este desarrollo las industrias químicas, petroleras y petroquímicas juegan un papel fundamental debido a la amplia variedad de bienes aportados por las mismas y al hecho de que en la actualidad la mayor parte de la energía producida proviene de los combustibles fósiles. Producto de este desarrollo se ha incrementado considerablemente el número de instalaciones industriales, el tamaño de las mismas y por consiguiente la cantidad de productos químicos procesados, producidos, transportados y almacenados en las mismas. Esta situación ha provocado un incremento de los accidentes tecnológicos en este tipo de empresas con un fuerte impacto sobre las personas lo bienes y el medio ambiente.

Todo este desarrollo científico técnico, conlleva también a una mayor probabilidad del aumento del riesgo para provocar un desastre de origen tecnológico, aumentando la posibilidad de grandes accidentes con un fuerte impacto sobre personas, el medio ambiente y los bienes. Este tipo de desastre está directamente relacionado con la actuación del hombre en la realización de distintos procesos tecnológicos con determinado grado de peligro. Son innumerables los tristes hechos que recoge la historia como consecuencia de escapes, explosiones o incendios provocados por este sector industrial.

La industria del petróleo ha sido un sector que ha presentado alto riesgo. Algo que evidentemente está relacionado en muchas ocasiones con el desconocimiento y la incorrecta manipulación de productos químicos peligrosos que, por su carácter tóxico, corrosivo, inflamable, explosivo, oxidante, radioactivo o nocivo entrañan una cierta peligrosidad para los trabajadores, además de manejarse considerables volúmenes de combustibles que son altamente volátiles.

Además de las características de las sustancias utilizadas, los accidentes por incendio y explosión, están vinculados a las condiciones de trabajo (presión, temperatura) y al estado de los equipos que almacenan o procesan este tipo de productos, porque los materiales con el tiempo sufren de fatiga y corrosión. De esta manera puede concluirse que los accidentes de origen tecnológico son evitables y ocurren fundamentalmente como consecuencia de errores humanos, fallo de materiales o por desviaciones del funcionamiento habitual de las maquinarias.

La Empresa de Perforación y Extracción Petróleo del Centro (EPEP-Centro) se especializa en las actividades de extracción, recolección, transporte, tratamiento y venta de petróleo crudo y gas

acompañante para satisfacer las necesidades y expectativas de los clientes, preservando el medio ambiente mediante el control de los aspectos ambientales significativo. Las condiciones operacionales en dicho proceso resultan complejas y significativamente peligrosas; esto se debe a la agresividad de las sustancias que se manejan, así como su potencial para provocar serios daños desde la perspectiva de la integridad y salud de las personas hasta el impacto ambiental debido a esto, constantemente la instalación para el tratamiento de crudos está expuesta, entre otros tipos de riesgos, al peligro y consecuencias que proporcionan el incendio y la explosión.

Sin embargo la planta no cuenta con un estudio que cuantifique de forma predictiva los efectos de accidentes ocasionados por incendio explosión y toxicidad, a criterio de la autora se decide centrar esta investigación en los tanques de almacenamiento y tratamiento de petróleo crudo por ser estos los más riesgosos debido a que en ellos se almacenan la mayor cantidad de combustible de toda la planta en un instante de tiempo. Es por esta razón que se plantea como **problema de la investigación:**

¿Cómo predecir los posibles riesgos por incendio, explosiones y toxicidad, y sus efectos, en los tanques de almacenamiento y tratamiento de la Planta de Tratamiento de Crudos?

Para dar solución a este problema se plantea como **hipótesis** de trabajo:

Si se compara el análisis de riesgo mediante las metodologías de los Índices de Incendio y Explosión (IFE) de Dow y de Incendio, Explosión y Toxicidad (MOND) de ICI, se podrá predecir la magnitud de los daños ambientales como consecuencia de los mismos.

Para dar cumplimiento a la hipótesis se propone el siguiente objetivo general:

Objetivo: Determinar el riesgo por incendio, explosión y toxicidad en los tanques de almacenamiento y tratamiento de la Planta de Procesamiento de Crudo.

Objetivos específicos:

1. Establecer las herramientas más usadas para evaluar los riesgos por incendio, explosión y toxicidad.
2. Caracterizar el proceso de tratamiento termoquímico del petróleo crudo que tiene lugar en la Planta de Procesamiento de Crudos de EPEP Centro.
3. Evaluar mediante las herramientas seleccionadas el riesgo de incendio, explosión y toxicidad en los tanques de almacenamiento y tratamiento de petróleo crudo.

Capítulo 1: Análisis bibliográfico

El presente capítulo se realiza una revisión bibliográfica donde se abordan diferentes definiciones relacionadas con riesgo y seguridad industrial, específicamente los riesgos por incendio, explosión y toxicidad. Son comprendidos también en este apartado, metodologías usadas en la evaluación de riesgos, las cuales están estructuradas por diferentes métodos que son aplicados según la institución objeto de estudio, la profundidad del análisis que se requiere, el presupuesto con que se cuenta, las sustancias químicas involucradas en el proceso y otros factores, en general. Además, se recogen algunos de los riesgos más comunes en el manejo, almacenamiento y transporte de combustibles. Para la realización de este capítulo se visitó el centro de información de la Universidad de Matanzas, y diferentes sitios relacionados con la temática en Internet.

1.1. Definiciones generales sobre riesgo, incendios, explosiones y toxicidad

1.1.1. Riesgo

Se han propuesto diversas definiciones de riesgo: “situación que puede conducir a una consecuencia negativa no deseada en un acontecimiento”, o bien “probabilidad de que suceda un determinado peligro potencial”, o aún “consecuencias no deseadas de una actividad dada, en relación con la probabilidad de que ocurra”. (Casal, Vílchez, Rodríguez, Planas & Montiel, 2002). En el contexto de la prevención de riesgos debe entenderse como la probabilidad de que ante un determinado peligro se produzca un cierto daño, que puede cuantificarse (Contreras, 2016).

Sin embargo, para Cabrera & De la Torre (2018) el riesgo está asociado a la probabilidad de que un peligro se convierta realmente en un evento con unas consecuencias determinadas, es decir, la combinación de la probabilidad de ocurrencia de un evento y sus consecuencias. Además, plantean que cuando la probabilidad y las consecuencias están expresadas numéricamente, el riesgo es el producto de ambas.

Por otra parte, Sano, Koshiba & Ohtani (2019) plantean que las formas más comunes de riesgos en las instalaciones son golpes, contactos térmicos, proyecciones, incendios y explosiones. Algo que está relacionado con las características peligrosas de las sustancias utilizadas (inflamables, tóxicas o explosivas), con las condiciones de trabajo (temperatura y presión) y con el estado de los materiales de los equipos (fatiga, corrosión).

1.1.2. Incendios

Para la Escuela Nacional de Protección Civil (2015) un incendio es el proceso de fuego que se propaga de una forma incontrolada en el tiempo y en el espacio.

Poujaud (2017) plantea que un incendio es una reacción química de oxidación - reducción fuertemente exotérmica, donde los reactivos son el oxidante y el reductor. En terminología de incendios, el reductor se denomina combustible y el oxidante, comburente; las reacciones entre ambos se denominan combustión. Para que un incendio se inicie es necesario que el combustible y el comburente se encuentren en espacio y tiempo en un estado energético suficiente para que se produzca la reacción entre ambos.

Zhang (2018) define el incendio como una manifestación del fuego que se desarrolla sin control en el tiempo y en un lugar imprevisto provocando daños y pérdidas. El fuego es un fenómeno de reacciones químicas de oxidación-reducción con un elevado potencial exotérmico.

Según Parrales (2011) para que un incendio se inicie tienen que coexistir tres factores: combustible, comburente y la energía de activación que conforman el conocido triángulo del fuego, este nos indica los elementos que son necesarios para que se inicie la reacción de combustión. Zhang (2018) plantea que en los últimos tiempos se ha descubierto un cuarto elemento, que también es necesario para mantener la combustión. Se trata de la reacción en cadena, cuya inclusión en el triángulo ha ocasionado que se pueda hablar también del tetraedro del fuego. Esta reacción en cadena desprende calor. Dicho calor se transmite al combustible, lo que conlleva consigo la consecuencia lógica de que lo alimenta. Al alimentar el combustible nuevamente, ello ocasiona, como podemos suponer, que la combustión continúe.

Piedra & Valdieso (2013) establecen que hay tres tipos de incendios, los cuáles son los siguientes:

- **Incendio de charco (*pool fire*):** combustión estacionaria con llama de difusión del líquido de un charco de dimensiones conocidas (extensión), que se produce en un recinto descubierto, un derrame en el piso dentro de un tanque constituye un ejemplo de este tipo de escenario.
- **Dardo de fuego (*jet fire*):** llama estacionaria y alargada (de gran longitud y poca amplitud) provocada por la ignición de un chorro turbulento de gases o vapores combustibles, el soplete o un gasoducto constituyen un buen ejemplo de este tipo.
- **Llamarada (*flash fire*):** llama progresiva de difusión, de baja velocidad, no produce ondas de presión significativas, generalmente está asociada a la dispersión de vapores

inflamables a ras de suelo, cuando éstos encuentran un punto de ignición, el frente de la llama generado se propaga hasta el punto de emisión, barriendo y quemando toda la zona ocupada por los vapores en condiciones de inflamabilidad.

1.1.3. Explosiones

Lianling *et al.* (2014) plantea que el término explosión se refiere a un estallido asociado con un estrepitoso y agudo ruido y un frente expansivo de presión, que varía desde una onda de choque supersónica a una ráfaga de viento relativamente suave. Desdichadamente, el término también se ha extendido para referirse a fenómenos químicos o físico - químicos que producen explosiones. Se define una explosión, como una súbita liberación de gas a alta presión en el ambiente.

Por otra parte, Garaniya, Baalisampang, Abbassi, Khan & Dadashzadeh (2019) dicen que se puede definir una explosión como una liberación repentina de energía, que genera una onda de presión que se desplaza alejándose de la fuente mientras se disipa la energía. Esta liberación tiene que ser, no obstante, bastante rápida y concentrada para que la onda que se genera sea audible. No es necesario, pues, que se produzcan daños para poder considerar este fenómeno como explosión. La energía liberada puede haber sido almacenada inicialmente bajo una gran variedad de formas: nuclear, química, eléctrica o de presión. Además plantea que, las explosiones pueden ocurrir en diferentes espacios:

1. Espacios cerrados por:

a) Ignición de mezclas gaseosas inflamables

Ocurre cuando habiéndose producido un escape de un gas o de un vapor inflamable en un área confinada, el gas está dentro de los límites de inflamabilidad y encuentra un punto de ignición.

b) Ignición de polvo combustible en suspensión

Para que se produzca la explosión de una nube de polvo es necesario que el polvo sea combustible, que las partículas tengan dimensiones y distribución adecuadas para la combustión, que el oxígeno sea suficiente para que la misma se mantenga; y, principalmente, es necesario que exista una fuente de ignición con energía suficiente para iniciar la reacción.

2. Espacios abiertos por:

a) Ignición de nubes de vapor no confinado

Las nubes de vapor no confinadas se generan a raíz del escape de una cantidad determinada de un vapor combustible que, al formar una mezcla con el aire dentro de los límites de inflamabilidad y si existe fuente de ignición, tiene lugar la explosión de la nube. Se considera una de las más peligrosas dentro de la industria química, debido a que los escapes tóxicos pueden producir más

víctimas. Por otra parte, el alcance que puede llegar a tener la nube, la ignición de la misma puede producirse en un punto alejado de la fuente origen del vertido y afectar a grandes áreas.

3. Por explosión de recipientes:

- de gas comprimido
- de gas licuado o líquido sobrecalentado (en inglés BLEVE, *boiling liquid expanding vapor explosion*)
- reacciones fuera de control (en inglés *runaway reactions*).

Blengini *et al.* (2017) y *Health, Safety & Environment* (HSE, 2018) plantean que las explosiones de tipo BLEVE son uno de los peores accidentes que pueden ocurrir en la industria química o en el transporte de mercancías peligrosas.

Desde un punto de vista riguroso estas explosiones no siempre tienen efectos térmicos. No obstante, en la mayoría de los casos reales la sustancia involucrada es combustible; esto provoca que la explosión sea seguida por la formación de una bola de fuego, de efectos muy graves (Díaz, 2013).

1.1.4. Toxicidad

Según Lugo (2015) la toxicidad es la habilidad de moléculas o compuestos químicos de producir lesiones o daños al alcanzar un sitio susceptible del cuerpo. Generalmente, se relaciona con la dosis letal media (DL 50), que es la dosis, con la cual muere el 50% de los organismos de una población expuesta experimentalmente.

He & Weng (2019) definen la toxicidad como la capacidad de una sustancia para producir daños en los tejidos vivos, lesiones, enfermedad grave o en casos extremos la muerte, cuando se ingiere, inhala o se absorbe a través de la piel.

Para Lugo (2015) la toxicidad puede ser de varios tipos:

1. Aguda: Este término se utiliza en el sentido médico para significar de corta duración.
2. Crónica: Este término se utiliza en contraste con el término aguda y significa de larga duración. Es aplicable a materiales que se inhalan o absorben a través de la piel. Se refiere a una exposición prolongada o repetida de duración medida en días, meses o años.
3. Local: Este término se refiere al sitio de acción del agente y significa que la acción tiene lugar en el punto o área de contacto. El sitio puede ser la piel, membranas mucosas de los ojos, nariz, boca, garganta o en cualquier parte a lo largo del sistema respiratorio o gastrointestinal. La absorción generalmente no ocurre.

4. Sistémica: Este término se refiere a que el sitio de acción no es otro que el punto de contacto y presupone que la absorción ha tenido lugar. Es posible, sin embargo, para los agentes tóxicos, ser absorbidos a través de canales (piel, pulmones o canal intestinal) y producir más tarde manifestaciones en uno de éstos, que no son resultado del contacto directo original.

1.2. Riesgos más comunes en la industria del petróleo en la manipulación, almacenamiento y transporte de combustibles

En la Industria química de procesos se producen accidentes; un suceso se puede catalogar como accidente si es inesperado, inevitable e indeseado, de entre los que se pueden destacar los escapes tóxicos, explosiones e incendios, que tiene como causas más comunes los fallos de material (una rotura en un depósito de almacenamiento), errores en la operación (operar por encima de los límites de presión o temperatura), perturbaciones externas y fallos humanos (Ibarra, Goya, Guerra, Dupin & Pérez , 2015).

En el **Anexo 1** se muestran las principales industrias en las que se pueden producir los diferentes riesgos que se mencionan anteriormente según Ibarra *et al.*, (2015).

González (2016) plantea que, a lo largo de los años en todo el mundo, han sucedido infinidad de accidentes, desde accidentes en pequeñas industrias hasta en grandes industrias pertenecientes a prestigiosas compañías. En todos los casos han causado pérdidas, ya sea de bienes materiales o vidas humanas, así como graves daños al medio ambiente.

La industria del petróleo está sometida a riesgos de toda especie, cuyo origen puede ser debido a deficiencias técnicas, como averías en el equipamiento tecnológico, a causas naturales imprevisibles, como las tormentas o los incendios, las explosiones, los fallos operacionales o por errores humanos. Un resumen de accidentes industriales relacionados con la industria petrolera acaecidos en el mundo en los últimos años se presenta en el del **Anexo 2**, como se puede apreciarlas las causas principales de los mismos son los fallos operacionales o los errores humanos.

Según Fagundo (2012) los riesgos más frecuentes en el manejo, almacenamiento y traslado de combustibles son las explosiones, derrames, incendios y fugas. Los riesgos involucrados con el traslado de mercancías son aquellos que están relacionados con la energía explosiva de detonación y explosión en las carreteras, ferrocarriles o conductos. Las explosiones constituyen el

riesgo más eminente en el manejo, almacenamiento y traslado de combustibles. La probabilidad de ocurrencia de esta se puede determinar mediante un análisis histórico de accidentes.

Este mismo autor establece que los incendios que se producen en el interior de los tanques de almacenamiento en un 65% de los casos se inician con la explosión de la mezcla vapor-aire que contienen y como resultado se producen diferentes grados de roturas. El carácter de la rotura depende de la fuerza de la explosión, tipo de construcción y estado del tanque.

Kidam & Hurme (2013) plantean que los accidentes más frecuentes causados en equipos son los sucedidos en tuberías en un 25%, en reactores y tanques de almacenamiento con un 14%, y los tanques de proceso con un 10%. Los seis equipamientos más propensos a accidentes representan acerca de un 80% de los accidentes totales ocurridos en equipos de procesos, por lo que, a estos equipamientos, hay que prestarles mayor atención. El 78% de los accidentes en equipos son debidos a fallas en el diseño y de técnicas ejecutadas por humanos.

La más reciente de la Comisión de Comunidades Europeas (Blengini *et al.*, 2017), (Gyenes, Wood & Struckl, 2017) se plantea que los incendios y explosiones son de los accidentes más frecuentes en la industria, de ahí la importancia de su estudio y evaluación de su impacto.

Según Necci (2015) la ocurrencia de accidentes relacionados a la actividad industrial ha sido más frecuente que en años anteriores, mientras que, los pocos accidentes que ocurrieron y pueden ocurrir, poseen un mayor potencial para causar enormes pérdidas. Por esta razón, los llamados accidentes en cascada, los cuales conducen a escenarios de baja frecuencia y alto impacto son crecientes en el mundo actual. Durante estos eventos, una cadena de eventos resulta en un accidente industrial mayor con consecuencias terribles y bastante impredecibles.

Según *Health, Safety & Environment* (HSE, 2016) el análisis cuantitativo de riesgos incluye, en los casos de seguridad, particularidades suficientes que demuestren que se han identificado todos los peligros con el potencial de causar un accidente mayor y para esto es indispensable el análisis de los accidentes provocados por efecto continuado.

Un alto grado de concentración de actividades industriales dentro de una planta química, genera la base para accidentes que tienen un impacto simultáneo sobre muchas unidades de la planta, que eventualmente resultan en víctimas, contaminación ambiental, además, de grandes pérdidas monetarias. Los eventos en cascada pueden ser el resultado de un ataque terrorista o del efecto dominó, un evento, en el cual, el escalado de un accidente primario se maneja por la propagación de un evento primario a unidades cercanas, causando un incremento total de la severidad del accidente (Necci, 2015).

1.3 Análisis de riesgos industriales

Las plantas químicas no deben ser solamente rentables desde el punto de vista económico, deben evitar o minimizar también el riesgo ante los factores de riesgo tecnológicos, colocando esto a la seguridad como uno de los principales componentes en la operación de estas plantas (Medina, Jiménez & Grossmann, 2014). Para evitar o minimizar el riesgo primero hay que identificarlo y evaluarlo, la evaluación del riesgo consiste en determinar las consecuencias y sus probabilidades de hechos de riesgo identificados, teniendo en cuenta la presencia (o no) y la eficacia de cualquier control existente, en combinación con las consecuencias y probabilidades para establecer un determinado nivel de riesgo.

Nolan (2018) define el análisis de riesgos como un término que se aplica a técnicas analíticas que se usan para la evaluación de peligros. Técnicamente, el análisis de riesgos es una herramienta para la evaluación de la probabilidad de ocurrencia y las consecuencias de un incidente con implicación de peligro.

Mientras que Poujaud (2017) reporta que para la determinación de los niveles de riesgos, el primer requisito es la identificación de los peligros que envuelven a las instalaciones. Este proceso se realiza en dos fases, la primera para detectar posibles accidentes y la segunda para la caracterización de sus causas, o sea, los sucesos o cadenas de sucesos que provocan el incidente no deseado; la primera fase es relativamente sencilla, pero debe realizarse con mucha atención, porque define el desenlace de la segunda. Las técnicas de análisis tienen características distintas, lo cual las hace apropiadas para ser aplicadas a diferentes etapas de la vida de una instalación o para proporcionar un nivel de detalle de estudio diferente.

1.4. Métodos generales de evaluación de riesgos en la industria de procesos químicos

Para identificar los peligros presentes en una instalación industrial existen metodologías que, además, son ampliamente utilizadas para predecir la frecuencia con que ocurrirá un evento no deseado, así como conocer la magnitud del daño que se producirá. Estas evaluaciones pueden realizarse desde una perspectiva cualitativa donde se requiere un amplio conocimiento del proceso en estudio, a diferencia de los métodos cuantitativos, los cuales se caracterizan por recurrir a cálculos numéricos que tributan a una serie de índices que cuantifican daños (Toledo, 2016).

En el **Anexo 3** se detallan una recopilación de las técnicas más importantes que aparecen en la literatura según Marhavidas, Koulouriotis & Gemeni (2011) e Ibarra *et al.* (2015).

Mientras que Nolan (2018) plantea que las técnicas pueden ser tanto cuantitativas como cualitativas en dependencia del nivel de análisis requerido.

Sano *et al.* (2019) establece que las técnicas de identificación de peligros no se limitan solo al estudio de los grandes sucesos no deseados, conocidos como accidentes mayores, sino también a la posibilidad de que se produzcan otros incidentes relacionados con el funcionamiento de los procesos. Además, plantean que, en los entornos industriales, los sucesos no deseados muchas veces tienen lugar como resultado de condiciones de proceso inadecuadas.

Existe un sinnúmero de metodologías encaminadas a identificar peligros y/o evaluar riesgos ya sea bajo una perspectiva cualitativa o bajo métodos cuantitativos.

Casal *et al.* (2002), reflejan como los métodos más utilizados para el análisis de riesgos:

- Métodos cualitativos: Auditoría de seguridad (*Safety review*) análisis histórico de accidentes, análisis preliminar de peligros (*Preliminar Hazard Analysis, PHA*), listados de control, análisis de peligro y operabilidad (*Hazard and Operability Analysis, HAZOP*) y análisis de modos de fallos y efectos (*Failure Mode and Effect Analysis, FMEA*).

- Métodos semicuantitativos: Índice DOW, Índice Mond, Índice SHI y MHI (*Substance Hazard Index and Material Hazard Index*), Árboles de fallos (*Fault Tree, FT*) y Árboles de sucesos (*Event Tree, ET*).

Este mismo criterio, acerca de que los métodos más empleados para el análisis de riesgo son los métodos cualitativos y los semicuantitativos, lo comparten Cabrera & De la Torre (2018).

Toledo (2016) plantea que para la realización de un exhaustivo análisis de riesgos existen diferentes técnicas o métodos de apoyo, que se dividen en tres grandes grupos:

- a) Comparativos.
- b) Generalizados.
- c) Índices de riesgos.

Los métodos comparativos, de acuerdo con Casal *et al.* (2002), proporcionan una primera idea general del peligro de la instalación a estudiar. Por su parte, los generalizados, a criterio de la autora, permiten una visión más detallada del peligro intrínseco y de operación de la instalación, pero no cuantifican las consecuencias de los accidentes ocasionados en una industria: por lo que no constituyen el objetivo de estudio de este trabajo. En cambio, los índices de riesgos, también denominados por García (2014) como métodos semicualitativos, se caracterizan por recurrir a una clasificación de las áreas de una instalación en base a una serie de índices que miden su potencial para ocasionar un daño en función de una serie de magnitudes y criterios. Por tanto, a

continuación, serán explicados de forma resumida los métodos comparativos y los generalizados y se hará mayor énfasis en los índices de riesgos, con el objetivo de seleccionar aquellos que más se ajusten a las características del proceso que se estudia y permita dar solución al problema en cuestión.

1.4.1. Métodos Comparativos

Se fundamentan en la utilización de técnicas obtenidas de la experiencia adquirida en equipos e instalaciones similares existentes, así como en el análisis de sucesos que hayan ocurrido en establecimientos parecidos al que se analiza (Casal *et al.*, 2002). Según Luis (2010), se basan en la experiencia previa acumulada en un sector industrial determinado. Son muy utilizados en el análisis preliminar de riesgo.

Algunos de los métodos comparativos más utilizados son:

- ✓ Lista de comprobación o verificación.
- ✓ Análisis preliminar de peligros (PHA).
- ✓ Análisis histórico de accidentes.

Según Poujaud (2017) es una metodología que no compromete muchos recursos materiales o humanos, lo que la convierte en simple y económica. Su gran ventaja es que detecta peligros absolutamente reales, que ya en el pasado se han puesto de manifiesto.

1.4.2 Métodos generalizados

Los métodos generalizados de análisis de riesgos se basan en estudios de las instalaciones y procesos muchos más estructurados desde el punto de vista lógico-deductivo que los métodos comparativos. Normalmente, siguen un procedimiento lógico de deducción de fallos, errores, desviaciones de equipos, instalaciones, procesos, operaciones, que trae como consecuencia la obtención de determinadas soluciones para este tipo de eventos (Grupo de Investigación Analítica de Riesgos [GUIAR, 2008]).

Existen numerosos métodos generalizados entre estos se destacan:

- Análisis de peligro y operatividad (por sus siglas en inglés *HAZOP*)
- Análisis “¿Qué sucedería si...?” (*What if?*)
- Análisis de modalidades de fallos y sus efectos (*FMEA*)
- Análisis de árbol de fallos (*FTA*)
- Análisis de árbol de eventos (*ETA*)

Análisis de peligros y operabilidad (HAZOP)

El análisis de peligros y operatividad (*HAZard and OPerability analysis*, HAZOP), es un método que fue diseñado en Inglaterra en la década de los sesenta por *Imperial Chemical Industries (ICI)* para aplicarlo al diseño de plantas de fabricación de pesticidas (Cabrera & De la Torre, 2018).

Nolan (2018) plantea que HAZOP es una técnica de revisión cualitativa de investigación sistemática. Se emprende para realizar un examen crítico sistemático del proceso que ya se encuentra en funcionamiento o que está en la fase de proyecto. Para evaluar el potencial de riesgo que se levanta en conjunto de la desviación en las especificaciones del plan y los efectos en la industria en general. Esta técnica normalmente se realiza por un equipo calificado que usa una técnica de incitar palabras guías para identificar las preocupaciones del plan intencional. De estas palabras guías, el equipo puede identificar escenarios que pueden resultar un riesgo o un problema operacional. Entonces se discuten las consecuencias del riesgo y medidas para reducir la frecuencia con que el riesgo ocurrirá.

El método de análisis HAZOP presupone tres hipótesis que constituyen sus principales limitaciones (Crawley, 2015).

- ✓ La instalación está bien diseñada, en relación con la experiencia, el conocimiento de los procesos implicados y la aplicación de las normas y códigos pertinentes.
- ✓ Los materiales de construcción han sido los adecuados y la construcción y el ensamblaje se han hecho correctamente.
- ✓ Los análisis son una “fotografía instantánea” donde se mezclan sucesos de efecto inmediato con sucesos de elevada inercia temporal.

Análisis “¿Qué sucedería si...?”

Sánchez (2016) expone que es un método de análisis no muy estructurado y necesita la adaptación por parte del usuario al caso particular que se pretende analizar. Consiste tal como su nombre lo indica en cuestionarse el resultado acerca de qué sucedería en caso de presencia de sucesos indeseables que puedan provocar consecuencias adversas. Evidentemente, requiere un conocimiento básico del sistema y la disposición mental para combinar o sintetizar las desviaciones posibles ya comentadas. Tiene un ámbito de aplicación amplio debido a que depende del planteamiento de las preguntas que pueden ser relativas a cualquiera de las áreas que se proponga la investigación como: seguridad eléctrica, protección contra incendios, seguridad personal, entre otras. Normalmente, las cuestiones se formulan por un equipo de dos o tres personas especialistas en las áreas apuntadas, los cuales necesitan documentación detallada de la

planta, del proceso, de los procedimientos y posibles entrevistas con personal de operación. El resultado del trabajo será un listado de posibles escenarios incidentales, sus consecuencias y las posibles soluciones para la reducción del riesgo.

El objetivo fundamental de este método es la detección y análisis de las desviaciones sobre los procesos y condiciones previstas e intenta evitar aquellos eventos que pueden resultar no deseables. Básicamente consiste en responder cualitativamente a una batería de preguntas del tipo ¿Qué pasa si? en relación con la cantidad o la concentración de las materias primas o en relación con las variables del proceso o los servicios necesarios

Por otro lado, Nolan (2018) señala que Para llevar a cabo este análisis de forma estructurada se recomienda seguir la línea de proceso desde la recepción de los materiales hasta la entrega del producto terminado. En la primera fase se le pide a los participantes que planteen cualquier pregunta del tipo ¿Qué pasa si? en relación con cada unidad o etapa del proceso. Una vez recopiladas todas estas situaciones se intentará dar respuesta a cada una de ellas con la participación de especialistas si fuera necesario. Una vez identificados los peligros y sus posibles consecuencias deben proponerse las medidas disponibles para minimizarlos.

Este autor plantea que resulta un sistema muy creativo y de simple aplicación (y, por tanto, muy económico). Sin embargo, aun si se realiza de modo estructurado, puede pasar por alto algunos peligros menos evidentes, pero no por ello menos graves.

Análisis de modalidades de falla y sus efectos (FMEA)

El método consiste en la elaboración de tablas o listas con los posibles fallos de componentes individuales, los modos de fallos, la detección y los efectos de cada fallo (GUIAR, 2008).

Según Arencibia (2018) es una técnica muy utilizada en los sistemas de calidad para identificar causas de fallos. Se inicia el estudio identificando todos los equipos de la planta para establecer sus condiciones normales de proceso. Si se da la circunstancia de que una situación de fallo en un equipo produce una alteración en otro, debe trasladarse esta influencia al estudio del equipo afectado. Una vez conocidas las consecuencias, se deben proponer las acciones de mejora necesarias para eliminar o reducir el peligro.

En general, para cada elemento se realiza una tabla con las siguientes columnas: elemento, descripción del equipo, modo de fallo, forma de detección del fallo, efectos del fallo y medidas correctoras.

Análisis de árbol de fallos

Pulido (2005) considera que es una técnica cuantitativa que permite estimar la probabilidad de ocurrencia de un fallo determinado a partir del conocimiento de la frecuencia de ocurrencia de los sucesos iniciadores o causales, mediante la utilización de procesos lógicos inductivos y la confección de una secuencia lógica de sucesos. Se inicia su aplicación con la identificación de los sucesos capitales, como la “explosión de un reactor”; se establecen a continuación los sucesos iniciadores que son capaces de por sí o en combinación con otros, de desencadenar el suceso capital y se estructura el árbol de fallos mediante puertas lógicas, se asigna a cada suceso básico la probabilidad de ocurrencia, conocida por propia experiencia o por consulta a bancos de datos sobre la materia. Por último, se calcula la probabilidad de los sucesos compuestos mediante la aplicación del álgebra de Boole hasta alcanzar el suceso capital.

Análisis de árboles de eventos

Mediante esta técnica se pretende estructurar la secuencia de eventos básicos que desencadena un tipo de accidente concreto, donde establece también las probabilidades de ocurrencia, si el conocimiento de los sucesos básicos lo permite. Para su aplicación se identifican los sucesos básicos o iniciadores y se aplican todas las disyuntivas lógicas que sean procedentes hasta obtener una representación gráfica en forma de árbol horizontal. En la que quedan representadas todas las posibles evoluciones del sistema según se den o no las diferentes alternativas planteadas, hasta los sucesos accidentales finales (Pulido, 2005).

1.4.3. Índices de Riesgo

Conjunto de métodos específicamente diseñados para evaluar el riesgo asociado a instalaciones químicas, tanto de proceso como de almacenamiento (Ibarra *et al.*, 2015). Su objeto es el de determinar cuáles son los factores más influyentes en la gravedad de los accidentes industriales con sustancias peligrosas y tener una imagen general de todas aquellas variables que afectan a sus probabilidades de ocurrencia (frecuencia), efectos y consecuencias. Un índice de riesgo tecnológico, por tanto, intenta evaluar el riesgo inherente de una instalación o proceso industrial, por comparación con otros considerados estándares, mediante el uso de unas listas de comprobación cuantificada y más o menos detallada según el índice utilizado.

Según lo planteado por Luis (2010) los índices de riesgo tecnológico pueden estructurarse, a los efectos del mismo, en tres grandes categorías fundamentales en función de su nivel de descripción (nd) como se muestra en el **Anexo 4**.

Índice basado en la definición matemática de riesgos

Según Casal *et al.* (2002) se entiende como índice de riesgo basado en la definición matemática, aquellos cuya aplicación se hace según la definición: riesgo = frecuencia \times magnitud. Se incluyen en este tipo índices el método *Fine*, el sistema de Evaluación o propuesta de tratamiento de riesgos (SEPTRI) y el *Hazard Rating Number* (HRN)

- *Fine*

Se trata de un método no exclusivo de la industria química, elaborado y publicado desde 1975, según reporta Montes de Oca (2013). Es apto para valorar cualquier tipo de peligro, de aplicación universal y muy simple, pero con poca especificidad y selectividad. El método determina el grado de peligrosidad como un producto de la probabilidad de ocurrencia del suceso por dos coeficientes: uno de consecuencias y otro de exposición al riesgo. Su grado de representación de la realidad de un riesgo concreto es prácticamente nulo.

- Sistema de evaluación y propuesta de tratamiento de riesgos (SEPTRI)

El método evalúa las consecuencias del evento en términos económicos, por ello no es válido para estimar otro tipo de daños susceptibles de ser considerados (daños a las personas y al medio ambiente). Su ámbito de aplicación no se restringe a un peligro concreto, sino que, al igual que el método *Fine*, es apto para evaluar cualquier factor de peligrosidad. Su aplicación requiere un conocimiento estadístico de las probabilidades de ocurrencia del evento que, por lo general, son difíciles de conocer, resultan incompletas, poco precisas, cuando no inexistentes (Paltrinieri & Khan, 2016).

- *Hazard rating number* (HRN)

Según Carol (2001) su fundamento teórico es muy similar al de los índices *Fine* y SEPTRI, aunque en este caso se evalúan las consecuencias del evento en función del daño a las personas y no, como en los casos anteriores, como valor económico del daño. Se basa en el producto de cuatro factores:

1. Posibilidad de exposición al peligro.
2. Frecuencia de la exposición al peligro.
3. Número de personas sometidas al peligro.
4. Máxima pérdida probable.

Índices basados en la carga de fuego

Se clasifican como índices basados en la carga de fuego aquellos que por diseño son aplicables a instalaciones genéricas, sin importar de forma significativa el tipo de actividad desarrollada en su

interior. El estudio se dirige en aquellos que valoran el riesgo de incendios y explosión (Carol, 2001).

- **Método simplificado de evaluación del riesgo de incendio (MESERI)**

El método fue desarrollado en 1990 y propone el cálculo de un índice simplificado del riesgo de incendio exclusivamente. Está especialmente orientado a evaluar el riesgo en edificios de uso general. Implica el conocimiento de las reglas técnicas de protección contra incendios para tener una idea aproximada del nivel de riesgo de incendio asumido en una instalación. Esta sencillez le resta cualquier especificidad, y resulta muy limitada su aplicación sobre riesgos del sector químico, debido a que no se tiene en cuenta las características del proceso, los materiales (reactividad, toxicidad) y los procedimientos de trabajo (Toledo, 2016).

- **Gretnener**

Según Carol (2001), está orientado a la evaluación matemática del riesgo de incendio de las construcciones industriales y de edificios. No es un índice de riesgo específico para la industria química. Asume como punto de partida que el riesgo cumple las normativas vigentes en materias de seguridad tales como distancias entre edificios, vías de evacuación e iluminación de seguridad.

- **Método de los coeficientes K**

Es un método de evaluación que se basa en suponer que la acción destructora del fuego se desarrolla en dos ámbitos distintos: los edificios y su contenido. Pretende determinar si la estabilidad y la resistencia al fuego de un determinado recinto es suficiente o no en función del riesgo intrínseco del mismo para garantizar el confinamiento del incendio. Toledo (2016) alega que hace una extensa referencia al equipamiento contra incendio y a las medidas de seguridad por lo que resulta demasiado complejo para una utilización operativa.

- **Método de los factores α**

Es un método de evaluación de riesgos parcial muy similar al Coeficiente K, aunque más simple. Pretende determinar si la estabilidad y resistencia al fuego de un determinado recinto es suficiente o no en función del riesgo intrínseco del mismo, de manera que se garantice que, de iniciarse un incendio en su interior, sus consecuencias quedarían confinadas, sin afectar a otros sectores. En general, se trata de un cálculo de la existencia y estabilidad del fuego, y de las posibilidades de confinamiento de un incendio en recintos cerrados. En realidad, no es un método de evaluación del riesgo en su estado puro, más bien supone un método de ayuda para el cálculo

de los elementos de sustentación y separación de procesos especialmente peligrosos respecto a fuego-incendio (Domínguez, 2014).

- **Índice de Purt**

Según Domínguez (2014), el método Purt es un método completo y muy metódico, facilita los cálculos y ofrece un informe al final. Se basa en suponer que la acción destructora del fuego se desarrolla en dos ámbitos: los edificios y su contenido, considerando indirectamente a las personas y propone medidas de detención y extinción orientativas.

Índices basados en la peligrosidad de las sustancias químicas

Dentro de esta categoría se contemplan, por la proximidad al objeto de estudio, aquellos desarrollados para valorar el riesgo en instalaciones industriales con actividad química, uso y manipulación de sustancias peligrosas que puedan dar lugar a la ocurrencia de incendios, explosiones, fugas o derrames, intoxicación.

Fagundo (2012) considera que estos índices centran su atención en los peligros de incendio y explosión y pasan por alto, o valoran de forma muy superficial, los riesgos derivados de emisiones a la atmósfera o de vertimientos líquidos a cauces públicos. En general, no están convenientemente evaluadas las consecuencias medioambientales.

A continuación, se explican brevemente las características fundamentales de cada uno de ellos.

- **Método IFAL (*Instantaneous Fractional Annual Loss*)**

Se basa en el cálculo de la pérdida anual esperada, expresada como fracción del total del valor de la planta evaluada, promediada durante un largo período de años y suponiendo que durante ese período las condiciones de operación se mantengan constantes. Se compone de tres factores: uno de ingeniería, uno de gerencia y el más importante, el de proceso, que incluye la evaluación de cinco escenarios diferentes: fuegos en líquidos, fuegos de vapores, explosiones de vapor no confinadas, explosiones de vapor confinadas y explosiones internas (Carol, 2001).

La principal utilidad de este método se encuentra en que durante la fase de diseño de una planta se puede estimar la variación de la pérdida anual esperada en función de las modificaciones que se van introduciendo.

- **Método UCSIP (*Union des Chambres Syndicales d'Industrie du Pétrole*)**

Desarrollado en Francia para las industrias petroleras, refinerías y plantas petroquímicas, pero puede ser adaptado a otras industrias del sector químico. Sus objetivos son el análisis semicuantitativo de riesgos en términos de probabilidad y gravedad, que se integran en el cálculo del factor de seguridad. Éste se determina sobre la base de tres valores (Toledo, 2016):

- Participación en el riesgo del sistema, calculado en función de seis parámetros que caracterizan el sistema y que tienen asignada una determinada ponderación entre 0 y 5.
- Importancia del riesgo en operación, calculado en función de seis parámetros que caracterizan la operación del sistema y que tienen asignada una determinada ponderación entre 0 y 5.
- Nivel de gravedad, valor que mide la magnitud de las consecuencias y que adopta un valor entre 0 y 6.

El nivel de gravedad contempla los siguientes escenarios accidentales:

1. Rotura de sistemas que transfieran un líquido a presión
2. Estallido de un equipo a presión
3. Pérdida de confinamiento de un tanque o depósito
4. Rotura de un equipo en rotación

Para cada uno de estos escenarios se desarrolla un árbol de sucesos y con la ayuda de 58 correlaciones o fórmulas se pueden estimar las consecuencias finales siguientes:

- Toxicidad
- Generación de proyectiles
- Sobrepresión por onda de choque
- Radiación térmica
- Derrame de líquido
- Dispersión de nube de gas.

Para autores como Rosero (2015), los resultados aportados por estas correlaciones suelen ser simplificados y conservadores, en el sentido de que se adopten las correspondientes al peor caso esperado.

Para la autora de este trabajo el método precisa una menor dedicación de tiempo que el desarrollo y cuantificación mediante árboles de fallos y eventos. Pero no se realiza un análisis sistemático de causas que conducen al accidente por lo que se pierde la valiosa información que se recoge en este tipo de estudio.

- **Índice CEI (*Chemical Exposure Index*) de Dow**

La primera versión de este método fue elaborada en 1986 por la compañía *Dow Chemicals* y la primera revisión fue publicada por el Instituto Americano de Ingenieros Químicos (AIChE), del inglés: *American Institute of Chemical Engineers* en 1994. El método contempla el riesgo de exposición a contaminantes químicos derivado de un accidente tecnológico agudo. No evalúa las probabilidades de ocurrencia del suceso y no valora la mayor o menor peligrosidad intrínseca del

proceso, sino que únicamente estima la peligrosidad de manipular una sustancia peligrosa en un área determinada (Duclos & Binder, 1995).

Otros autores como Etowa, Amyotte, Pegg & Khan (2002) opinan que el índice CEI facilita un método simple para valorar la posible gravedad para las personas en las proximidades de una planta debida a la manipulación de sustancias peligrosas, como consecuencia de una fuga accidental. No pretende definir si una instalación es o no más segura que otra. Por sí mismo, es una herramienta preliminar de evaluación de riesgos que permite priorizar las actuaciones correctoras allí donde la gravedad potencial es más evidente.

- **Índice IFE de Dow**

El índice de incendio y explosión desarrollado por la compañía *Dow Chemicals* y respaldado por la *AICHE*, es un índice de riesgo exclusivo para incendios y explosión en plantas químicas con riesgo de incendio significativo. Los objetivos del método son: cuantificar el daño esperado ocasionado por un incendio o una explosión, identificar los equipos que generen el mayor riesgo potencial y priorizar las medidas a adoptar (Rosero, 2015).

El método permite evaluar riesgos de forma semicuantitativa para proyectos y para plantas existentes, comparar unidades y/o plantas entre sí, comparar procesos antes y después de modificaciones y sirve de referencia para promover la seguridad inherente de procesos. Además, permite establecer la rentabilidad de las inversiones en mejoras de seguridad. Es un método bastante económico en recursos y tiempo y requiere de buena información referente al proceso y equipos (*American Institute of Chemical Engineers [AIChE]*, 1994).

Piedra & Valdivieso (2013) opinan que este índice es una de las herramientas usadas para la evaluación realista del riesgo potencial de fuego, explosión y reactividad química de los equipos de proceso y su contenido. Desarrollado en 1964, se ha convertido en un índice completo que proporciona una medida del riesgo relativo de pérdidas de unidades individuales de proceso debido a fuegos o a explosiones potenciales.

Aunque el método está diseñado principalmente para cualquier operación en la que se almacene, se maneje o se procese un material inflamable, combustible o reactivo, puede también ser utilizado para analizar pérdidas potenciales en instalaciones de tratamiento de aguas residuales, sistemas de distribución, tuberías, rectificadores, transformadores, calderas, oxidadores térmicos y algunos elementos de centrales eléctricas. Se puede utilizar también para evaluaciones del riesgo de procesos pequeños como plantas pilotos con inventarios modestos de materiales potencialmente peligrosos. (AIChE, 1994).

Autores como AIChE (1994), Fibbiani & Moreno (2004) y GUIAR (2008), coinciden en que es el índice de peligro más reconocido por la industria química y proporciona información clave para evaluar el riesgo total de fuego y explosión.

Este índice ha sido utilizado en Cuba por autores como Fagundo (2012) para evaluar el riesgo por incendio y explosión en la planta Ciclo Combinado ENERGAS S.A. Varadero donde obtuvo que la unidad de destilación por fraccionamiento es la que presenta el valor más elevado del Índice de Incendio y Explosión y a su vez las mayores pérdidas probables totales; Toledo (2016) también emplea este índice para evaluar los riesgos por incendio y explosión en la etapa de destilación atmosférica de la refinería de petróleo Camilo Cienfuegos donde, la aplicación del mismo permite demostrar que las unidades de proceso que presentan un grado de riesgo severo son los hornos y las torres de destilación.

El método Índice de Dow de Fuego y Explosión se desarrolla siguiendo las etapas que propone AIChE (1994).y se comentan a continuación:

- a) Dividir la planta en estudio en unidades de proceso para las que se determina su índice de incendio y explosión (IFE).
- b) Determinar un factor material FM para cada unidad de proceso.
- c) Evaluar los factores de riesgo, considerando las condiciones generales de proceso (reacciones, transporte, accesos, etc.), denominadas F1, y los riesgos específicos del proceso/producto peligroso, denominados F2.
- d) Calcular el factor de riesgo (F3) como producto de F1 y F2 y el factor de daño para cada unidad determinada en a).El factor de daño es función del factor de riesgo y el factor de material y se obtiene mediante una gráfica que proporciona el manual del método.
- e) Determinar los IFE como producto de FM y F3 y el área de exposición (AE) para cada unidad de proceso seleccionada. El AE es función del IFE y se obtiene mediante una gráfica que proporciona el manual del método.
- f) Calcular el valor de sustitución del equipo en el área de exposición.
- g) Calcular el daño máximo probable a la propiedad (MPPD) real, por consideración de los factores de bonificación, reflejo de los sistemas de protección de los que dispone la unidad.
- h) Determinación de los máximos días de interrupción (MPDO) y los costos por interrupción de la actividad en estos días, como consecuencia del incendio o explosión en la unidad.

La autora de este trabajo plantea que para llevar a cabo este tipo de análisis es necesario un mínimo de información como los diagramas detallados del proceso, la instrumentación

implementada, hojas de especificaciones de equipos, los costos de la planta o unidad analizada y de ser posible, los gráficos actualizados de la edición más reciente de *Dow Fire and Explosion Hazard Classification Guide*. Si se dispone de toda la información el IFE es el método más completo para evaluar riesgos por incendio y explosión en una instalación porque da la posibilidad de comparar unidades entre sí, y conocer el efecto de las modificaciones en los procesos. Puede aplicarse tanto a sistemas productivos como a sistemas de almacenamiento. Además es bastante económico en recursos y tiempo.

- **Índice Mond**

El Índice Mond fue desarrollado por *Imperial Chemical Industries* (ICI) a partir del índice de Dow; en su primera versión de 1979 y la actual publicada en 1985. El Índice Mond – ICI, se basa en un factor de material, y en la cantidad presente para formular el peor caso posible (*Worst Case*) y la asignación de penalizaciones y/o bonificaciones a diferentes áreas e instalaciones de una planta química. Las penalizaciones son asignadas en función de las sustancias presentes y las condiciones de proceso. Dichas bonificaciones tienen en cuenta los tipos de control del proceso y las instalaciones de seguridad que pueden mitigar o prevenir efectos adversos a la operación de la instalación (Arencibia, 2018).

La principal diferencia con el anterior es que el índice de Mond introduce la toxicidad de las sustancias presentes como factor independiente, y considera los efectos de las sustancias tóxicas por contacto cutáneo, inhalación ingestión. También utiliza menos recursos gráficos, por lo que necesita un mayor número de cálculos para determinar los parámetros a considerar (Fagundo, 2012).

Para Domínguez (2014) esta metodología encuentra su empleo como método de clasificación previa, especialmente en grandes unidades o complejos, lo que permite identificar y clasificar las áreas con mayor riesgo potencial. Asimismo, genera las bases para la etapa posterior de evaluación de consecuencias con métodos convencionales.

Este método ha sido empleado por Arencibia (2018) para evaluar el nivel de riesgo de accidente tóxico en un tanque de tratamiento de petróleo en la planta de procesamiento de crudo EPEP Centro, donde demuestra que todos los índices calculados sin bonificación se encuentran en la categoría máxima de riesgo identificada en la metodología.

Toledo (2016) coincide en que el método de los índices de Mond es parecido, en estructura y características, al método IFE de Dow. Pero señala como las diferencias más importantes las que se muestran a continuación:

- Considera más detalles en los factores de riesgo y en las protecciones, por lo que utiliza índices correspondientes a los mismos.
- Considera de manera más específica los riesgos para la salud. Anteriormente esta era una diferencia muy relevante, pues las versiones anteriores del método de Dow no lo hacían, esta diferencia se ha resuelto en la versión número siete.
- Proporciona índices desglosados frente a varios peligros.

Según la autora de este trabajo este índice es más detallado que el IFE de Dow, tiene en cuenta mayor número de parámetros de riesgo y bonificaciones, además facilita una clasificación de unidades en función del riesgo y este método se seleccionará siempre que en la instalación se presenten sustancias tóxicas en cantidades apreciables.

1.5. Conclusiones parciales

1. En la industria petrolera o en instalaciones que almacenan combustibles los accidentes que pueden ocurrir con más frecuencia son los incendios, las explosiones y los que involucren sustancias tóxicas.
2. Un índice de riesgo tecnológico intenta evaluar el riesgo inherente de una instalación o proceso industrial por comparación con otros considerados estándares, mediante el uso de unas listas de comprobaciones cuantificadas y más o menos detalladas.
3. Se utiliza el índice IFE de Dow, pues es el método más reconocido para evaluar riesgos por incendio y explosión en instalaciones donde se manejan hidrocarburos, según la bibliografía consultada.
4. Se utiliza el Índice Mond de ICI para medir el nivel de riesgo de accidente tóxico, puesto que en la planta a analizar existen sustancias tóxicas, este índice tiene en cuenta mayor número de parámetros de riesgo y bonificaciones y además facilita una clasificación de unidades en función del riesgo.
5. La metodología del índice Dow solo se desarrollará hasta el cálculo del IFE porque a criterio de la autora, el resto de la misma no se ajusta a la economía empresarial cubana.

Capítulo 2: Materiales y métodos

En el presente capítulo se describe detalladamente el proceso de producción de crudo en la EPEP-Centro a partir del diagrama de flujo del proceso (**Ver Anexo 5**). Esto permite conocer las sustancias que se manipulan, las operaciones fundamentales, los equipos involucrados y las condiciones de trabajo. Posteriormente se explican las metodologías seleccionadas: Índice IFE de Dow, para realizar la evaluación de riesgos por incendio y explosión e Índice de Mond, que permite un análisis tanto cuantitativo como cualitativo del peligro presente en el proceso bajo estudio.

2.1 Descripción del proceso tecnológico de producción de petróleo en la EPEP-Centro

El objetivo general de la EPEP-Centro es aplicar un tratamiento adecuado a los crudos provenientes de los pozos en producción, de forma tal que se alcancen los índices de calidad requeridos para posteriormente enviarlos por bombeo hacia Base Crudo y Suministro de la División Territorial Comercializadora en la Ciudad de Matanzas.

Para la obtención del petróleo crudo con los índices de calidad establecidos, en la planta se realizan una serie de operaciones, que se enumeran a continuación:

1. Recepción de crudos

Consiste en recibir los crudos desde los Centros Colectores en producción a través del oleoducto y de pozos aislados en producción utilizando carros cisternas. Esto se realiza en el descargadero de la Planta, el cual está equipado de dos Piscinas de Recepción de 120 m³ de capacidad y comunicadas entre sí, de aquí el crudo se envía hacia el tanque que se decida para darle comienzo al proceso de tratamiento.

2. Calentamiento inicial del crudo

El objetivo es incrementar la temperatura del crudo el cual llega a la Planta a temperatura ambiente hasta un máximo de 85°C, este valor está sujeto a las condiciones de operación como son, nivel de incrustación, estado técnico de los intercambiadores, entre otros. Este calentamiento garantiza una mejor separación de gas en los separadores de la Segunda Etapa de Separación (SES) y en tanque 6, así como la continuidad del tratamiento termoquímico sobre la emulsión agua-petróleo, que garantiza una mejor separación del agua en los tanques de tratamiento. El crudo proveniente de las Estaciones de Rebombeo de los Centros Colectores, llega a los intercambiadores de calor donde se eleva la temperatura del mismo, hasta los valores ya mencionados.

3. Segunda Etapa de Separación

El objetivo de esta etapa es lograr una mayor separación de gas acompañante en cuatro separadores horizontales ubicados a 17 m de altura y a la salida de los intercambiadores de calor. La mezcla de gas y líquido entra a los separadores por un extremo donde parte del fluido de la mezcla se separa por la acción de la gravedad, debido a la caída de velocidad, el tiempo de residencia y al proceso de turbulencia controlada a que se somete la mezcla cuando pasa por los diferentes elementos mecánicos con que cuentan los separadores. El petróleo que se separa pasa por gravedad hacia el tanque 6, aunque puede pasar hacia cualquier otro tanque de la planta en dependencia de las necesidades, y parte del gas separado se envía a la Planta de ENERGAS y se incorpora al proceso de generación de electricidad. En el caso de que por algún motivo no se pueda recuperar el gas que se separa en esta etapa del proceso, se quema en el sistema de *flares* que tiene la instalación.

3. Trasego a tanque 6

El objetivo es separar todo el gas posible que no se separó en la SES. El petróleo entra a tanque 6 por la columna desgasificadora interior central, y sale por un orificio inferior, el gas separado en el interior del tanque es venteado a la atmósfera y el que se separa en la columna del tanque asciende hacia el separador de vapores. Cuando el nivel de crudo en el separador este próximo al 50% de su capacidad, se arranca la bomba para succionar estos condensados y son incorporados a la línea de entrada de petróleo a tanque 6.

4. Bombeo hacia los tanques de tratamiento

Consiste en bombear todo el crudo que se recibe del tanque 6 hacia cualquier parte del proceso en dependencia de las necesidades.

Para el bombeo desde tanque 6 hacia los tanques de tratamiento se dispone de 3 bombas de cavidades progresivas, que son los encargados de mantener el nivel de la columna de petróleo en el tanque alrededor de 4m.

5. Recepción, calentamiento y reposo en los tanques de tratamiento

El objetivo es la culminación del tratamiento para lograr 2,0% de sólidos y agua (BSW) para trasegarlo hacia la Estación Cabecera del Oleoducto (ECO).

El crudo es bombeado del tanque 6 a los tanques de tratamiento estáticos de 5 000 m³, 10 000 m³ y 20 000 m³, según los tanques en que se esté realizando el tratamiento por condiciones del proceso. Para el calentamiento se suministra vapor a través de los serpentines para que el crudo alcance temperaturas entre 85-90 °C.

El agua libre, conjuntamente con el agua liberada producto de la ruptura de la emulsión agua-petróleo, sufre un proceso de decantación durante el llenado de los tanques que se completa durante el reposo de los mismos. Esa agua depositada en el fondo de los tanques se drena por gravedad hacia el sistema de residuales de la instalación.

6. Tránsito a la Estación Cabecera del Oleoducto

El petróleo en calidad que se encuentra en los tanques de tratamiento estático del Área de Tratamiento se bombea hacia los tanques de la Estación Cabecera donde se almacena y se comprueba que la viscosidad se encuentre por debajo de 1 500 cSt para su posterior venta por el Oleoducto Magistral hacia Matanzas.

2.2 Descripción de la metodología empleada para el cálculo del Índice de Incendio y Explosión (IFE) de DOW

Para realizar la evaluación de los riesgos de incendio y explosión en la planta de procesamiento de crudo, se hará uso de la metodología de cálculo correspondiente a la séptima edición del índice IFE. Se desarrolla siguiendo las etapas publicadas por *AIChE* en 1994 que se muestran en la Figura 2.1:

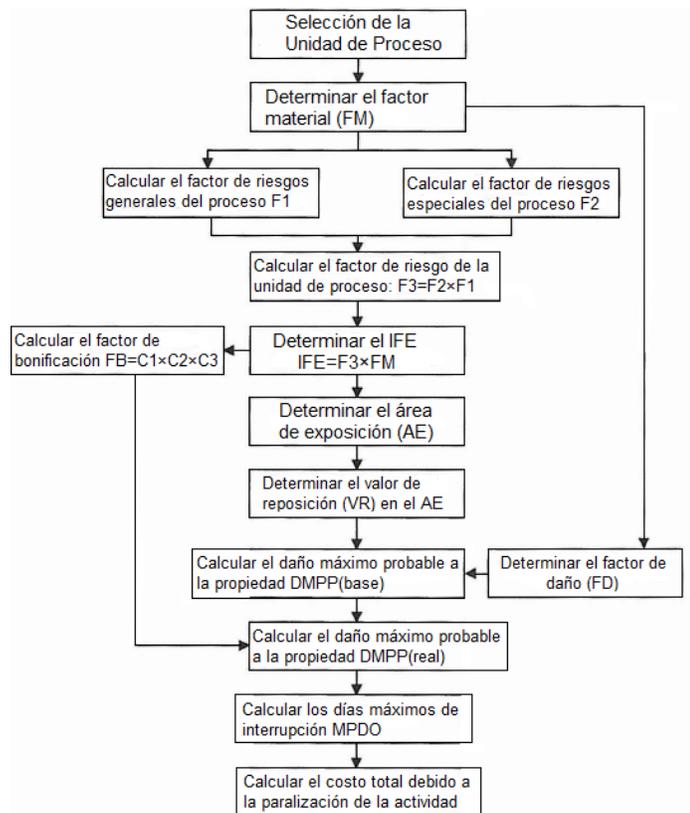


Figura 2.1: Procedimiento para el cálculo del IFE. **Fuente:** AIChE (1994).

Para tener una idea básica de los parámetros que considera el desarrollo del índice de DOW, se describe con detalle el contenido de cada una de las etapas indicadas anteriormente.

Etapla 1. Dividir la planta química en estudio en unidades de proceso para cada una de las cuales se determinará su Índice de Incendio y Explosión (IFE)

El criterio básico de adopción para seleccionar estas unidades será, por un lado, el nivel de detalle pretendido en el estudio y, por otro, la homogeneidad necesaria que permita la aplicación correcta del método. Una unidad de proceso es cualquier equipo de proceso importante, como un tanque de almacenamiento de materia prima, un tanque de proceso, una bomba de alimentación, un reactor, un separador, pero puede ser también un almacén. Es evidente que la mayoría de las unidades de fabricación tienen muchas unidades de proceso. Para calcular el IFE se deben considerar solamente las unidades de proceso que podrían tener un impacto desde un punto de vista de prevención de pérdidas.

Etapla 2. Determinar el factor material (FM) para cada unidad de proceso

El factor material (FM) es propio de la o las sustancias contenidas y manipuladas en la unidad de proceso que se analiza, así como de las temperaturas a las que se procesan. El FM representa la velocidad intrínseca de la emisión potencial de energía en los casos de fuego o explosión por la sustancia caracterizada. El FM puede estar tabulado para diferentes sustancias a una temperatura de hasta 60°C en AIChE, (1994). Dicha tabla se muestra en el **Anexo 7** de este trabajo.

Según Toledo (2016) en caso de que el valor del FM de determinada sustancia no se encuentre tabulado se puede obtener a través de los valores de reactividad (Nr) y de inflamabilidad (Nf) de las sustancias. Estos valores se aplican para las temperaturas hasta 60°C, por lo tanto el FM para sustancias expuestas a temperaturas superiores a 60°C debe ser ajustado por el procedimiento de ajuste de temperatura del FM. El valor de Nf y Nr así como sus descripciones cualitativas son presentados en la tabla 2.1 y tabla 2.2 respectivamente.

Tabla 2.1: Determinación del factor del material.

Líquidos y gases inflamables o combustibles ¹	NFPA 49	Reactividad o Inestabilidad				
		N _R = 0	N _R = 1	N _R = 2	N _R = 3	N _R = 4
No combustibles ²	N _F = 0	1	14	24	29	40
F.P. > 93,33 °C	N _F = 1	4	14	24	29	40
37,77°C < F.P. < 93,33°C	N _F = 2	10	14	24	29	40
F.P. < 22,7°C y B.P. > 37,77°C	N _F = 3	16	16	24	29	40
F.P. < 22,7°C y B.P. < 37,77°C	N _F = 4	21	21	24	29	40
Neblina o polvos combustibles³						
St-1 (K _{SI} < 200 bar m/sec)		16	16	24	29	40
St-2 (K _{SI} = 201-300 bar m/sec)		21	21	24	29	40
St-3 (K _{SI} > 300 bar m/sec)		24	24	24	29	40
Sólidos combustibles						
Denso > 40 mm espesor ⁴	N _F = 1	4	14	24	29	40
Abierto < 40 mm espesor ⁵	N _F = 2	10	14	24	29	40
Espuma, fibra, polvo ⁶	N _F = 3	16	16	24	29	40
FP (flash point): punto de flasheo; Nf: valor de inflamabilidad; Nr: valor de reactividad; BP (boiling point): punto de ebullición; St: referente a polvos.						

Fuente: Toledo (2016)

¹: Incluye sólidos volátiles.

²: No se quema en el aire cuando se expone a temperaturas de 815,6 °C por cinco minutos.

³: Los valores de K_{st} son referidos a recipientes cerrados de prueba de 16 litros de capacidad con una fuerte fuente de ignición.

⁴: Incluye madera de 2 pulgadas nominal, lingotes de magnesio.

⁵: Incluye materiales de tamaño de partículas grandes como paletas de plástico, estantes de sacos, paletas de madera.

⁶: Incluye cauchos (gomas de autos, zapatos).

Tabla 2.2: Descripción cualitativa para determinar el valor de reactividad (Nr).

Nr=0	<p>Materiales estables normalmente aún bajo fuego que incluyen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Materiales que no reaccionan con el agua. • Materiales que presentan un comportamiento exotérmico en el rango de $300^{\circ}\text{C} > T > 500^{\circ}\text{C}$.
Nr=1	<p>Materiales estables normalmente pero llegan a ser inestables a altas presiones y temperaturas, que incluyen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Materiales que pueden cambiar o descomponerse en el aire, luz o humedad. • Materiales que presentan un comportamiento exotérmico en el rango de $150^{\circ}\text{C} < T < 300^{\circ}\text{C}$.
Nr=2	<p>Materiales que reaccionan violentamente cuando hay cambios químicos en su forma a altas presiones y temperaturas, que incluyen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Materiales que presentan un comportamiento exotérmico a una temperatura de 150°C. • Materiales que reaccionan violentamente o forman materiales potencialmente explosivos con el agua
Nr=3	<p>Materiales que son capaces de explotar al descomponerse o pueden reaccionar al ponerse en contacto con fuentes de ignición o cuando se calientan en espacios cerrados que incluyen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Materiales que son muy sensibles térmicamente y mecánicamente bajo elevada presión y temperatura. • Materiales que reaccionan explosivamente con el agua aún bajo condiciones normales
Nr=4	<p>Materiales que son capaces de detonar, explotar y descomponerse rápidamente a presión y temperatura normal. Incluye materiales que son sensibles térmicamente y mecánicamente a presión y temperatura normales.</p>

Fuente: Toledo (2016).

El ajuste de temperatura se lleva a cabo solamente cuando la temperatura de la sustancia estudiada en la unidad de proceso está por encima de 60°C . El ajuste de temperatura del factor material se determina usando la tabla 2.3.

Tabla 2.3: Ajuste de temperatura del factor material.

Ajuste de temperatura del Factor Material	Nf	St	Nr
A. Entrar el valor de Nf (St para polvos) y Nr			
B. Si la temperatura $< 60^{\circ}\text{C}$, ir al "E"			
C. Si la temperatura está por encima del FP o si la temperatura $> 60^{\circ}\text{C}$ poner Nf=1			
D. Si la temperatura está por encima del inicio exotérmico o de la temperatura de autoignición poner 1 en Nr			
E. Sumar cada columna, pero poner 4 cuando el total es 5			
F. Usando "E" y la tabla 2.1, determinar el FM			
Nf: valor de inflamabilidad; Nr: valor de reactividad; St: referente a polvos; FP: punto de evaporación instantánea; FM: factor material.			

Fuente: Toledo (2016).

Etapa 3. Determinar el factor de riesgo de la unidad de proceso (F_3)

Después de determinar el FM adecuado, el paso siguiente es calcular el índice de riesgo de la unidad de proceso (F_3), que es el término que se multiplica por el FM para obtener el IFE.

El valor numérico del índice de riesgo de la unidad de proceso se determina a partir del producto del índice general de riesgo de la unidad de proceso (F_1) y el índice especial de riesgo de la unidad de proceso (F_2). Se utiliza el producto en lugar de la suma porque los elementos considerados en F_1 y F_2 tienen un efecto potenciador entre ellos.

Los riesgos de proceso que contribuyen a aumentar la magnitud y la probabilidad de pérdidas son penalizados en el cálculo e influyen en el resultado. Cuando se calculan las penalizaciones se recomienda escoger el momento más peligroso de la operación normal de la unidad de proceso. El arranque, la operación continua y la parada están entre los estados operacionales que pueden ser considerados.

En el **Anexo 8** se muestra una extensa lista de comprobación (tomada de Casal *et al.* 2001) donde se identifican todas las posibilidades de penalización y bonificación previstas en el método.

Evaluación de los riesgos generales del proceso (F_1)

Los riesgos generales del proceso son los factores que determinan principalmente la magnitud de un incidente. Hay seis elementos de riesgo a tener en cuenta en esta sección y son aplicables en la mayoría de las situaciones de proceso. Aunque puede que no sea necesario considerarlos todos, su evaluación cuidadosa para la unidad de proceso en estudio es de gran importancia.

A. Reacciones químicas exotérmicas.

Esta penalidad solo se aplica a unidades que incluyen reactores. Para otras unidades, la reactividad de las materias en cuestión ya se ha tenido en cuenta en el factor material, y no necesita ser añadida en la categoría presente.

En la tabla 2.4 se muestra de forma sencilla el valor de la penalidad que debe ser aplicado según el tipo de reacción que ocurre en las unidades de proceso.

Tabla 2.4: Penalidad para reacciones químicas exotérmicas.

Valor de la penalidad	Tipo de reacción
0,3	Reacciones poco exotérmicas como: hidrogenación, hidrólisis, isomerización, neutralización, sulfonación.
0,5	Reacciones moderadamente exotérmicas: alquilación, esterificación, reacciones de adición, de oxidación, polimerización y condensación.
1	Reacciones exotérmicas de control crítico como la halogenación.
1,25	Reacciones exotérmicas peligrosas como la nitración.

Fuente: AIChE (1994).

B. Procesos endotérmicos.

Se aplica una penalidad de 0,2 para cualquier proceso endotérmico que tiene lugar en un reactor. Pero cuando la energía que entra al proceso endotérmico proviene de la combustión de un sólido, líquido o combustible gaseoso, la penalidad se incrementa a 0,4. Por ejemplo se incluyen la pirólisis y el craqueo.

C. Manejo y transferencia de materia.

Este punto evalúa el potencial para el fuego que involucra la unidad del proceso pertinente durante el manejo, traslado y almacenamiento de materiales.

- Cualquier operación de carga y descarga que involucra a materiales inflamables de clase I (con punto de inflamación inferior a los 37,8°C), donde las líneas de traslado son conectadas y desconectadas se aplica una penalización de 0,5.
- La introducción de aire durante la adición manual de algunos ingredientes dentro de centrífugas, reactores discontinuos o mezcladores, puede crear riesgo de reactividad o inflamabilidad, se aplica una penalidad de 0,5.
- Penalizaciones de 0,85 se aplican para líquidos o gases inflamables con N_f entre 3 y 4, esta categoría incluye tambores cilíndricos y contenedor flexible portátil. Se le aplica una penalidad de 0,65 a combustibles sólidos con $N_f=3$, para $N_f=2$ la penalidad correspondiente es de 0,4 y para combustibles líquidos con un punto de evaporación instantánea (FP) superior a 37,8°C e inferior a 60°C se aplicará una penalidad de 0,25.

D. Unidades de proceso encerradas o interiores.

- Se aplica una penalización de 0,3 para cualquier proceso de manejo de líquidos inflamables a temperaturas superiores a las del punto de evaporación instantánea en un área confinada. Si la cantidad de líquido excede los 3 785 m³ se aplica una penalidad de 0,45.
- Cualquier proceso con líquidos inflamables manejados a temperaturas superiores a las del punto de ebullición en un área confinada requiere una penalidad de 0,6. Para cantidades de líquidos que excedan los 3 785 m³ se utiliza una penalidad de 0,9.

E. Acceso en caso de fuego.

Todas las áreas de proceso superiores a 925 m² que no tengan un acceso adecuado reciben una penalización de 0,35. Todos los almacenes con un área superior a 2 312 m² que no tengan un acceso adecuado reciben una penalidad de 0,35.

Las áreas pequeñas deben ser penalizadas con 0,2 si existen problemas potenciales para el fuego debido a accesos inadecuados.

F. Control de derrames y sistema de drenaje.

Si las sustancias en las unidades de proceso al ocurrir un derrame o drenaje este afecta solamente a la propia unidad de proceso entonces se le aplicará una penalidad de 0,5 y si además se ven afectadas otras unidades pues entonces se le atribuirá otra penalización de 0,5.

1.1 Riesgos especiales del proceso (F₂)

El riesgo especial de la unidad de proceso contribuye sobre todo a la probabilidad de que ocurra un incidente con pérdidas. Se calcula a partir de las condiciones específicas de proceso que han demostrado ser causa importante de los incidentes de fuego y de explosión. Se compone de doce elementos:

A. Material tóxico.

Se aplican penalizaciones cuya magnitud se incrementa con la toxicidad de las materias sujetas al proceso. El razonamiento se basa en que cualquier incidente es más difícil de manejar si se necesita ropa protectora o evacuación de personas. Toledo (2016) plantea que si el valor de la penalidad por toxicidad de una sustancia no está tabulado se puede determinar mediante la ecuación 2.1.

$$Penalidad = 0,20 N_H \quad (2.1)$$

Donde N_H es el factor de salud que se puede determinar mediante la tabla 2.5 o encontrarlo en AIChE (1994) apéndice A.

Tabla 2.5: Descripciones cualitativas para determinar el factor de salud

N _H =0	No ofrece peligro incluso ante condiciones de fuego.
N _H =1	Causa irritación y requiere el uso de un respirador de aire purificado.
N _H =2	Causa la inhabilitación temporal, lesión residual posible y requiere el uso de un equipo protector respiratorio
N _H =3	Requiere protección en todo el cuerpo.
N _H =4	Causa la muerte y lesión residual muy importante
N _H : factor de salud	

Fuente: Toledo (2016)

B. Presión sub-atmosférica.

Se aplica una penalización de 0.5 si una fuga permitiera entrar aire al sistema en el que materiales que sean sensibles al oxígeno o la humedad puedan formar mezclas inflamables.

Esta penalización es aplicada solo si la presión absoluta es menor que 66 875 Pa.

C. Operación dentro o próxima a la temperatura de inflamación.

La introducción o entrada de aire en un sistema conjuntamente con las condiciones de operación podrían llevar a la formación de una mezcla inflamable y a su vez crear un riesgo adicional para el proceso. Por tanto se penalizan:

- Tanques que almacenen líquidos inflamables con un $N_F = 3$ o 4, donde el aire puede entrar hacia el interior del tanque durante el vaciado o enfriamiento brusco del tanque. La penalización es de 0,5.
- Equipos o tanques de almacenamiento del proceso que podrían estar cerca o dentro del rango de inflamabilidad, sólo si existen fallas en los equipos, instrumentos o en las purgas, requieren una penalidad de 0,3.
- Procesos u operaciones que por su propia naturaleza siempre se hallan cerca de las condiciones de inflamabilidad bien porque la operación de purga no puede practicarse o bien porque se ha decidido no realizar la purga. La penalización es de 0,80.

D. Explosión de polvos.

Las penalizaciones de esta sección se aplican a las unidades de proceso que involucran el manejo del polvo en operaciones de transferencia, mezclado, molienda, empaquetamiento. Cabe destacar que la máxima velocidad de incremento de la presión, así como la presión máxima generadas por un polvo dependen de manera muy importante del tamaño de partícula; así si el polvo es más fino, mayor será el riesgo. De esta manera el valor de las penalizaciones varían desde 0,25 hasta 2 en función del tamaño de las partículas, y se encuentran en la tabla 3 de la guía publicada por AIChE en 1994.

E. Alivio de presión.

Cuando las presiones de operación están por encima de la atmosférica se aplica una penalización debido a que esta situación en caso de fuga incrementa la velocidad de emisión de los líquidos inflamables y combustibles.

Según Toledo (2016) este valor se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$Penalidad = 0,16109 + \frac{1,61503P}{1000} - 1,42879 \left[\frac{P}{1000} \right]^2 + 0,5172 \left[\frac{P}{1000} \right]^3 \quad (2.2)$$

Donde:

P: es la presión de operación de la unidad en psia.

Para el caso de esta penalidad se puede determinar mediante la figura 2.2 donde el eje de las abscisas corresponde a la presión de operación en psia y el eje de las ordenadas es el valor de penalidad:

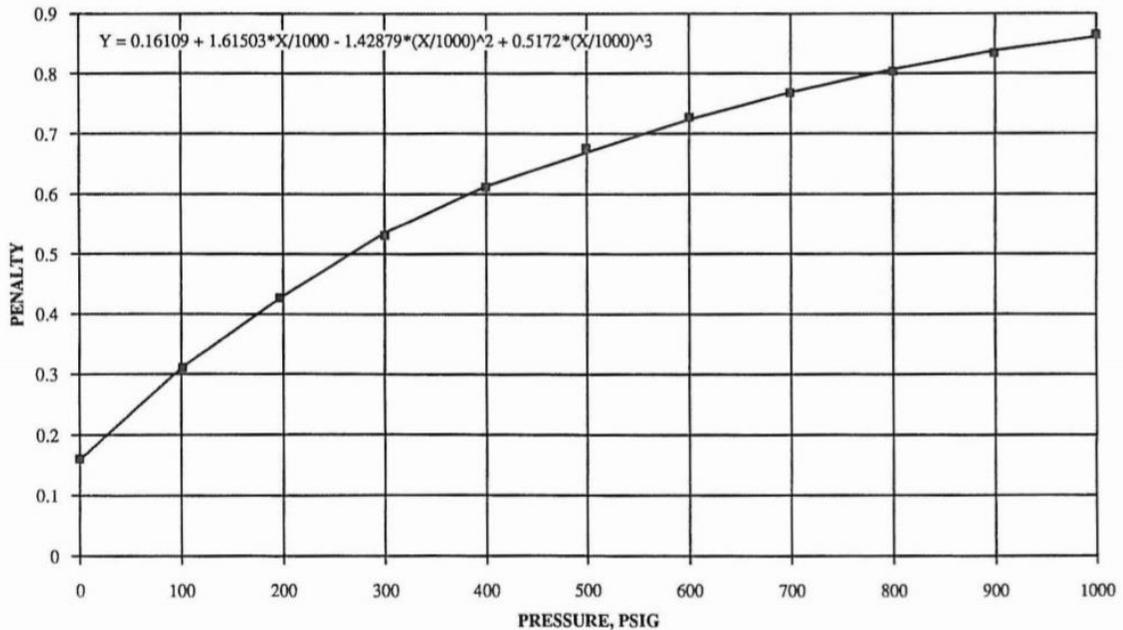


Figura 2.2: Determinación de la penalidad por presión de alivio para líquidos inflamables y combustibles. **Fuente:** AIChE (1994).

En el gráfico anterior:

- Para materiales de alta viscosidad tales como bitumen, aceites lubricantes pesados y asfalto se multiplica la penalidad por 0,7.
- Para gases comprimidos o líquidos inflamables presurizados con cualquier gas por encima de 15 psig se multiplica la penalidad por 1,2.
- Para los gases inflamables licuados (incluyendo todos los otros materiales inflamables almacenados sobre su punto de ebullición), se multiplica la penalidad por 1,3.

F. Baja temperatura

Se aplican penalizaciones para operaciones que se realicen a temperaturas extremadamente bajas, a no ser que éstas se hayan tenido en cuenta en la elección de materiales de construcción. Esta penalización incluye la consideración de fragilización posible del acero al carbono o de otros materiales. No obstante, raras veces surge tal penalización, debido a que la temperatura se tiene en cuenta cuando se elige el material de construcción.

G. Cantidad de material inflamable o inestable.

La penalización en este aspecto se define de la forma siguiente: la cantidad de materia presente en la unidad considerada se multiplica por la energía disponible en la materia que se está procesando, medida en términos de su calor de combustión. De ello se deduce que si se reduce la cantidad de materia disminuye la escala de cualquier incidente potencial.

Se aplica una penalidad a cualquier operación de proceso que incluya bombeo hacia los tanques y es válida para cuando la sustancia haya sido seleccionada para hallarle el factor material.

Para líquidos y gases en el proceso se usa la figura 2.3 y para líquidos y gases almacenados la figura 2.4, donde en ambas el eje de las abscisas corresponde al calor de combustión de las sustancias y el eje de las ordenadas al valor de la penalidad. Para combustibles sólidos almacenados y polvos en el proceso se utiliza la figura 2.5 y, a diferencia de los gráficos anteriores, el eje de las abscisas corresponde a la cantidad de sólidos medida en libras.

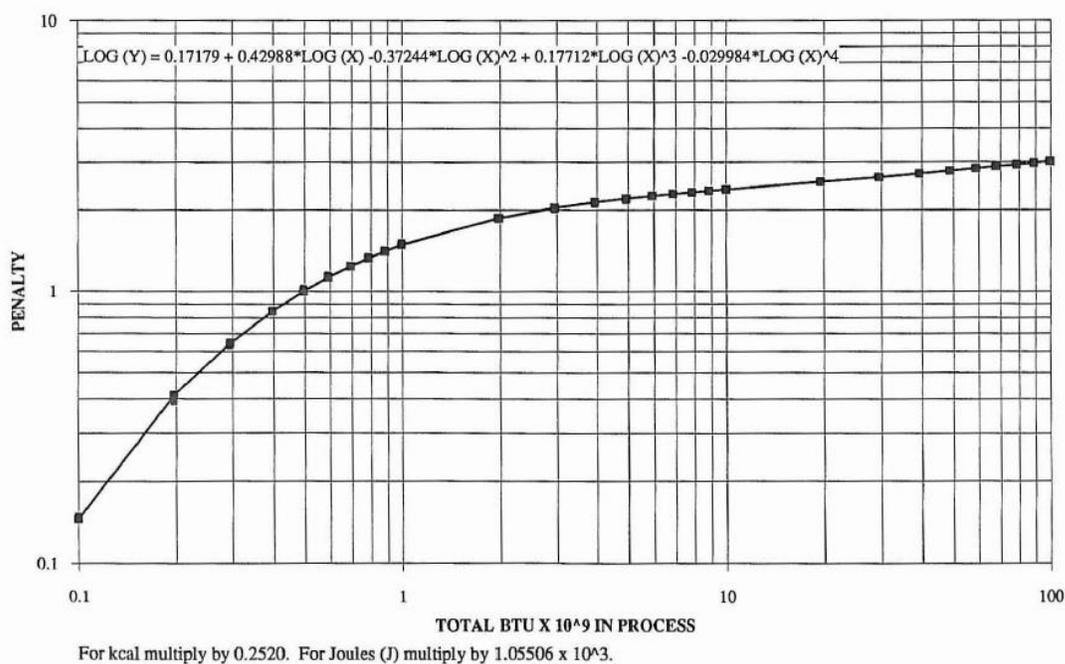


Figura 2.3 Penalidad para líquidos y gases en el proceso por cantidad de materia inflamable o inestable.

Fuente: AIChE (1994).

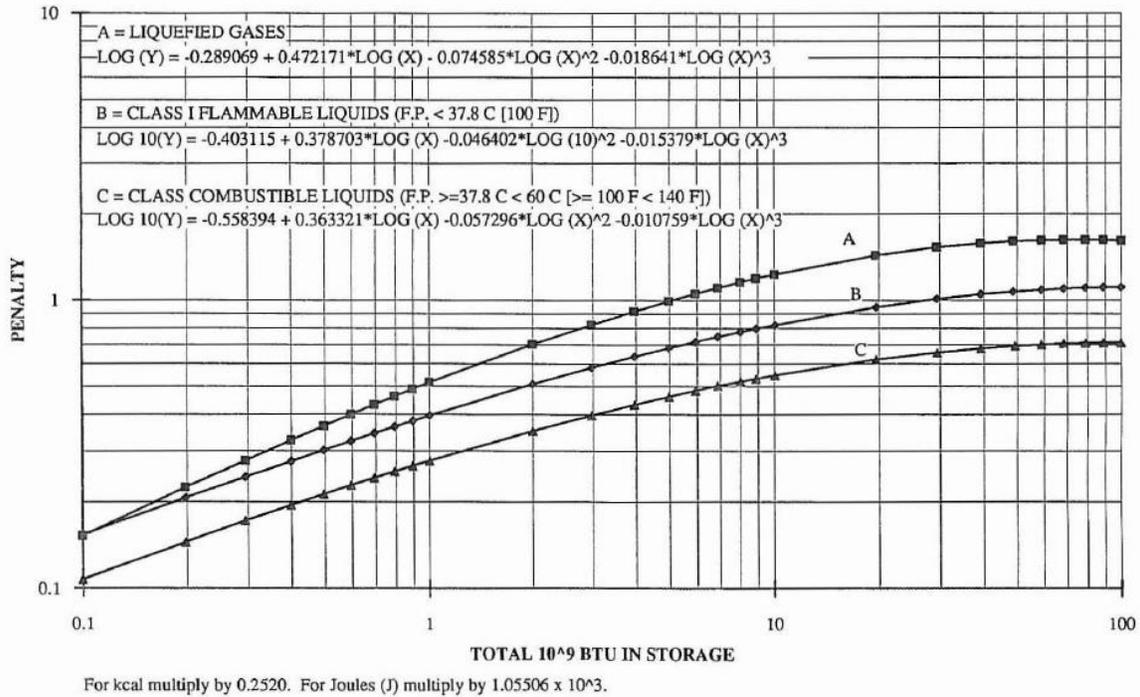


Figura 2.4 Penalidad para líquidos y gases almacenados por cantidad de materia inflamable o inestable. **Fuente:** AIChE (1994).

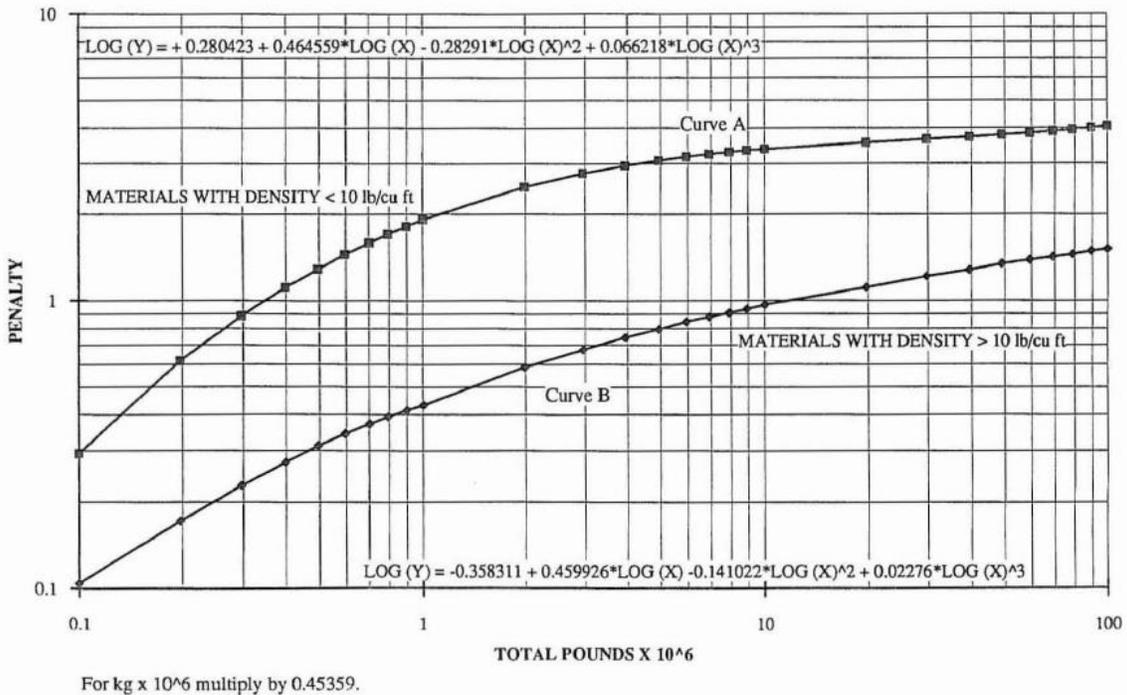


Figura 2.5 Penalidad para combustibles sólidos almacenados y polvos en el proceso por cantidad de materia inflamable o inestable. **Fuente:** AIChE (1994).

H. Corrosión y erosión.

Algunos problemas de corrosión y erosión todavía pueden ocurrir en ciertos procesos aunque el diseño sea correcto. Se considera que la velocidad de corrosión es la suma de las velocidades de corrosión internas y externas. No se debe pasar por alto los posibles efectos de las impurezas menores en las corrientes de proceso que podrían causar mayor corrosión interior que lo normal y la posibilidad de corrosión externa debido a la ruptura química de la pintura.

- Para velocidades de corrosión menores que 0,127mm/año con riesgos de picadura o erosión local la penalidad es de 0,1.
- Para velocidades de corrosión mayores que 0,127mm/año y menores que 0,254 mm/año la penalidad es de 0,2.
- Para velocidades de corrosión mayores que 0,254 mm/año la penalidad es de 0,5.
- Para cuando la corrosión, según el material, es por estrés entonces se le aplicará una penalidad de 0,75.

J. Fugas a través de juntas y empaquetaduras.

Se aplica una penalización en casos que pueden ir desde los sellos mecánicos simples y las juntas hasta los casos más severos de mirillas, piezas de fuelles, juntas de expansión o elementos frágiles.

-Si en la unidad de proceso existe una bomba con alguna fuga de menor naturaleza la penalidad será de 0,1.

-Si en la unidad de proceso existe un compresor con alguna fuga de menor naturaleza la penalidad será de 0,3.

-En la unidad de proceso donde el material es de naturaleza penetrante o un lodo abrasivo la penalidad es de 0,4.

-En las unidades de proceso donde existan mirillas o juntas de expansión, la penalidad es de 1,50.

K. Uso de equipos con fuego

El empleo de equipo sometido a llama o fuego directo atrae una penalización debido a que incrementa la probabilidad de ignición cuando se producen emisiones de vapores o líquidos inflamables o de polvos combustibles. La utilización de un fluido inerte como barrera segura en el sistema ocasiona una reducción de la penalización. Si el recipiente sometido a fuego está muy lejos de la unidad de proceso no debería asignarse esta penalización. Cuando el equipo está en la unidad de proceso la penalización es 1.

La figura 2.6 se utiliza para determinar dicha penalidad en función de la distancia a la que se encuentran los sometidos a fuego de la unidad de proceso.

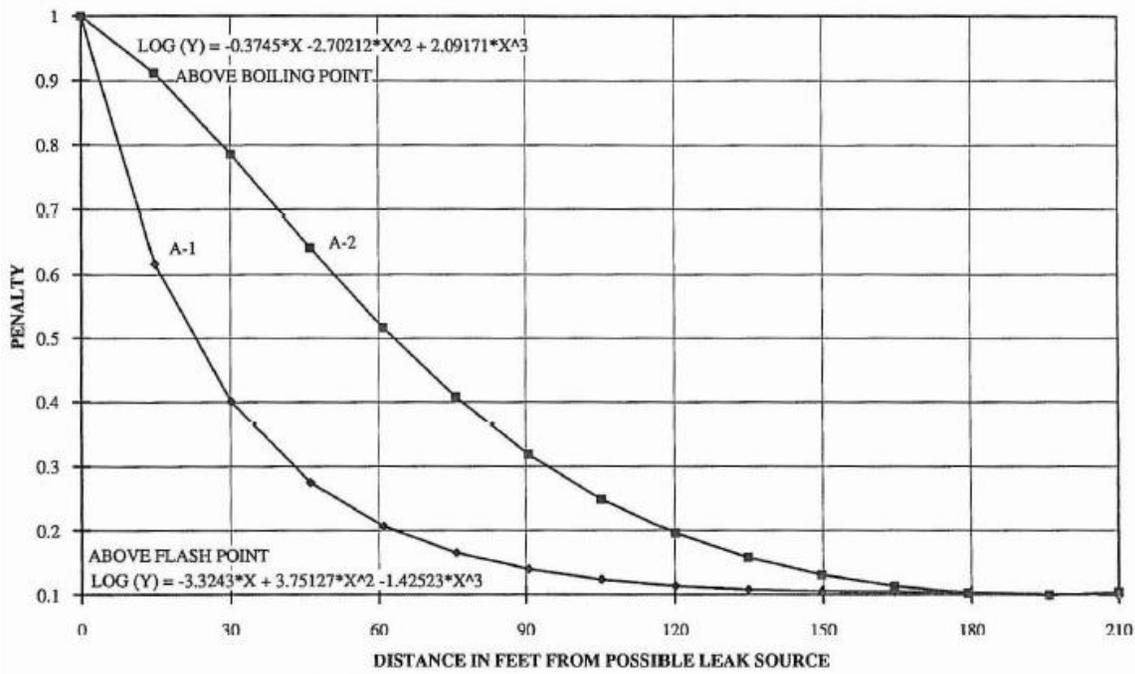


Figura 2.6 Penalidad para las unidades de proceso cercanas a equipos sometidos a fuego directo.

Fuente: AIChE (1994)

L. Sistemas de intercambio de calor con petróleo crudo y sus derivados.

Cuando los fluidos que se usan para la transmisión de calor son combustibles representan un riesgo adicional en cualquier proceso que los utilice.

Las penalizaciones que aquí se aplican se basan en la temperatura y en la cantidad de fluido utilizado para el intercambio de calor en la unidad de proceso. No se penalizará cuando el petróleo crudo y sus derivados no son combustible, ni tampoco cuando el fluido, aun si es combustible, se utiliza a temperaturas inferiores a las de su punto de evaporación instantánea.

Tabla 2.6: Penalidades según el volumen de los intercambiadores de calor.

Penalidad para equipos de transferencia de calor que utilicen aceite caliente		
Capacidad (m ³)	Penalidad por encima del punto de evaporación instantánea	Penalidad igual o por encima del punto de ebullición
< 18.9	0.15	0.25
18.9 a 37.9	0.30	0.45
37.9 a 94.6	0.50	0.75
> 94.6	0.75	1.15

Fuente: AIChE (1994).

M. Equipo rotativo

Las piezas grandes de equipos rotativos, tales como los compresores, y las bombas de gran potencia, tienen una historia de contribuir de manera significativa a pérdidas importantes. Por ello, se le asigna a su empleo una penalización de 0,5.

Finalmente los dos factores analizados anteriormente F_1 y F_2 componen el factor de riesgo del proceso (la expresión F_3) según 2.3.

$$F_3 = F_1 F_2 \quad (2.3)$$

Etapa 4. Obtención del índice de fuego y explosión (IFE)

El cálculo del IFE se usa para estimar el daño probable como resultado de un incidente en una planta del proceso. Factores como el tipo de reacción, las temperaturas del proceso, las presiones, las cantidades de combustible, indican la probabilidad y la magnitud potencial de un combustible que son el resultado de los fracasos en el control de procesos y fallas de equipos por fatiga, vibración, entre otros.

El IFE es el producto del índice de riesgo de la unidad de proceso (F_3) y del factor material (MF), de acuerdo a la expresión 2.4.

$$IFE = FM \cdot F_3 \quad (2.4)$$

La tabla 2.7 es un listado de los valores de IFE y la descripción del grado del peligro asociado al índice, que da una idea relativa de la severidad del mismo. Se necesita una revisión más detallada para las instalaciones con un IFE mayor de 128.

Tabla 2.7 Grado del riesgo según el valor del IFE

Rango (IFE)	Grado de riesgo
1-60	Ligero
61-95	Moderado
97-127	Intermedio
128-158	Importante
159 y superior	Severo

Fuente: AIChE (1994).

2.3 Descripción de la metodología empleada para el cálculo del Índice de Incendio, Explosión y Toxicidad Mond de ICI

Con el objeto de determinar cuáles son los factores más influyentes en la gravedad de los accidentes industriales con sustancias peligrosas y tener una imagen general de todas aquellas variables que afectan a sus probabilidades de ocurrencia (frecuencia), efectos y consecuencias, en el presente epígrafe se analizan las etapas o fases del índice de riesgo de Mond, que se muestran en la Figura 2.10:

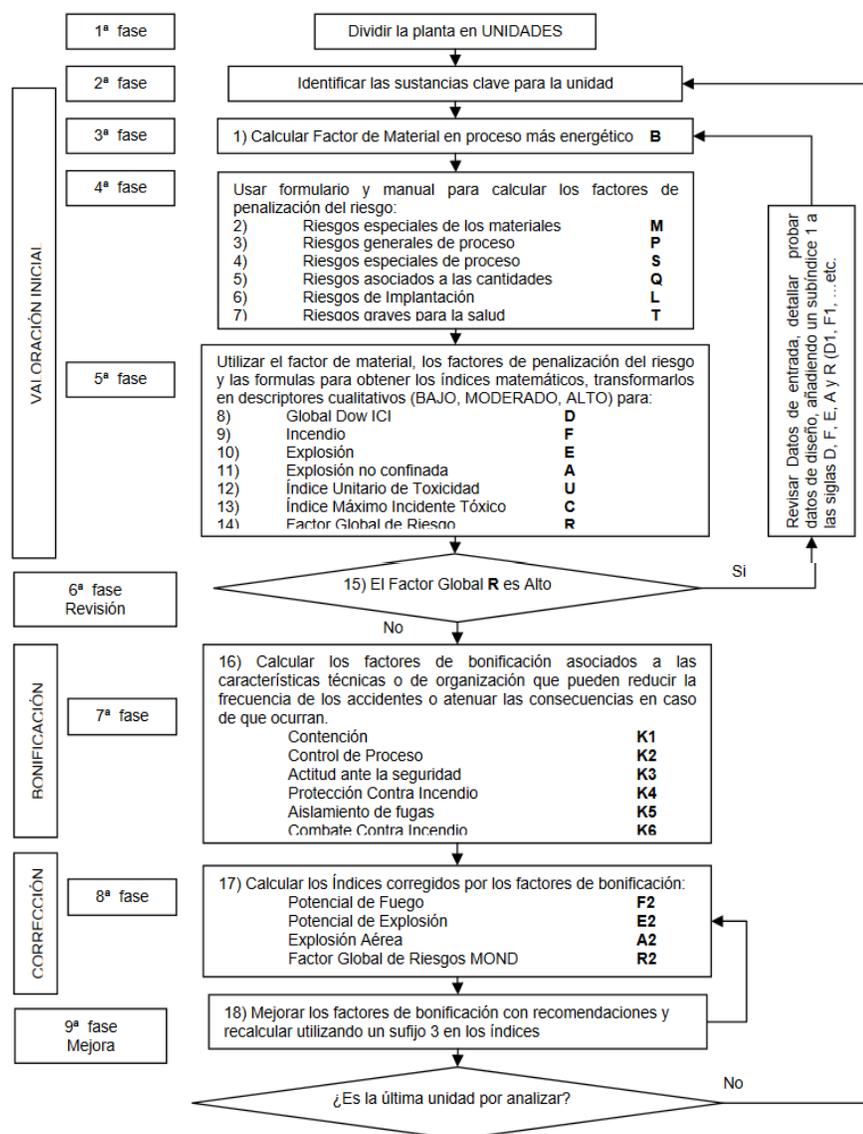


Figura 2.10: Procedimiento para el cálculo del índice Mond. Fuente: Plascencia (1995)

- **Primera Fase:** Dividir la planta en unidades de proceso. Identificar las sustancias peligrosas presentes en la unidad. Considerar a la unidad en su forma más básica con el número mínimo de controles necesarios para su operación normal.
- **Segunda Fase:** Consiste en determinar el material o mezcla principal y el Factor de Material (B).

El Factor Material para materiales normalmente inflamable se define como el calor neto de combustión en aire a 25°C del material clave en su estado normal (25°C y a presión atmosférica) y se calcula como sigue:

$$B = \frac{\Delta H_C}{1000} \quad (2.5)$$

Donde ΔH_C se expresa en BTU/lb de material clave.

- **Tercera Fase:** Cálculo de factores de Penalización del riesgo.

Se consideran los factores que pueden agravar el riesgo ponderando cada una de las siguientes variables: Riesgos especiales de los materiales (M), Riesgos generales del proceso (P), Riesgos especiales del proceso (S), Riesgos asociados a las cantidades (Q), Riesgos de implantación (L) y Riesgos graves para la salud (T)

Primeramente se calculan los Riesgos Especiales del Material a través de la ecuación 2.8

$$M = \sum_a^j \text{factores} \quad (2.6)$$

Los diferentes factores que componen este riesgo se pueden observar en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8: Riesgos Especiales de los Materiales (M):

Riesgos Especiales de los Materiales (M)	Rango	Factor
Productos oxidantes	0 a 20	
Dar lugar a gas combustible	0 a 30	
Características de mezcla y dispersión (m)	-50 a 100	
Puede inflamarse espontáneamente	30 a 250	
Puede polimerizarse espontáneamente	25 a 75	
Sensibilidad a la ignición	-75 a 150	
Puede dar descomposición explosiva	75 a 125	
Puede dar lugar a detonación del gas	0 a 150	
Propiedades de la fase condensada	200 a 1500	
Otros	0 a 150	
Factor de Riesgos Especiales del Material (M)		Σ (factores)

Fuente: Plascencia (1995)

En el **Anexo 9** se muestran los factores de riesgo correspondientes a Riesgos generales del proceso (P), Riesgos especiales del proceso (S), Riesgos asociados a las cantidades (Q), Riesgos de implantación (L) y Riesgos graves para la salud (T) y se calculan de la misma forma, o sea, como una sumatoria de todos los factores de penalización.

- **Cuarta Fase:** Cálculo de los Índices de Riesgo Potencial.

Se calculan los índices de riesgo potencial que son los que subsisten en caso de fallar todas las medidas de prevención y protección y control y que se denominan: Global Dow equivalente (D), Incendio (F), Explosión (E), Explosión no confinada (A), Índice unitario de toxicidad (U), Índice máximo incidente tóxico (C) y Factor Global de Riesgo (R).

1. Cálculo del Índice Global Dow (D)

Los factores individuales incluidos en los diferentes rubros, se totalizan en varios subgrupos que después, se incluyen en el Índice Global DOW equivalente (D) que se calcula de la siguiente manera:

$$D = B \left(1 + \frac{M}{100} \right) \left(1 + \frac{P}{100} \right) \left[1 + \frac{(S+L+Q)}{100} + \frac{T}{400} \right] \quad (2.7)$$

Donde:

B: Factor material

M: Factor por Riesgos Especiales del Material

P: Factor por Riesgos Generales del Proceso

S: Factor por Riesgos Especiales del Proceso

Q: Factor por Riesgos de Cantidad

L: Factor por Riesgos de Implantación

T: Factor por Riesgos de Toxicidad

Las descripciones del grado de riesgo global representado por el Índice Global DOW se estandarizan como se puede observar en la Tabla 2.9.

2. Cálculo de Potencial de Fuego (F)

Se considera útil estimar el potencial de fuego de la unidad porque esto da una indicación de la duración del fuego en el caso de un incidente. Para ello se usa la siguiente ecuación:

$$F = \frac{BK}{N} (20500 \text{ BTU}/ft^2) \quad (2.8)$$

Donde:

B: factor material

K: cantidad de material

N: área normal de trabajo

Se han dado también categorías para los valores de la cantidad de fuego F y se han identificado con duraciones de fuego usando datos y registros de incidentes como se muestra en la Tabla 2.10.

Tabla 2.9: Grado de riesgo global representado por el Índice Global DOW/ICI

Rango del Índice Global DOW (D)	Grado Total de Riesgo
0 – 20	Suave
20 – 40	Ligero
40 – 60	Moderado
60 – 75	Moderadamente alto
75 – 90	Alto
90 – 115	Extremo
115 – 150	Muy extremo
150 – 200	Potencialmente catastrófico
+ 200	Catastrófico

Fuente: Plascencia (1995)

Tabla 2.10: Categorías para los valores de la cantidad de Fuego F del área normal de trabajo

Cantidad de Fuego (F) del área normal de trabajo (BTU/ft ²)	Categoría	Rango de duración (fuego-horas)	Comentarios
0 – 50 000	Ligero	¼ - ½	
50 000 – 100 000	Bajo	½ - 1	Casas
100 000 – 200 000	Moderado	1 – 2	Fábricas
200 000 – 400 000	Alto	2 – 4	Fábricas
400 000 – 1 000 000	Muy alto	4 – 10	Edificios ocupados
1 000 000 – 2 000 000	Intenso	10 – 20	Bodegas de hule
2 000 000 – 5 000 000	Extremo	20 – 50	
5 000 000 – 10 000 000	Muy extremo	50 – 100	

Fuente: Plascencia (1995)

3. Cálculo de Potencial de Explosión (E)

En determinadas situaciones se observará que un nivel dado de categoría del Índice Global DOW/ICI, se acompañará por una cantidad de Fuego de menor categoría. Esto indica que se deben examinar variaciones en el Riesgo de Explosión. Se calcula un Índice E de explosión interna de la planta, como una medida del riesgo de explosión interior utilizando la ecuación:

$$E = 1 + \frac{M+P+S}{100} \quad (2.9)$$

Donde:

M: Factor por Riesgos Especiales del Material

P: Factor de Riesgos Generales de Proceso

S: Factor de Riesgos especiales de Proceso

Tabla 2.11: Categorías para determinar el Índice de Explosión Interna de la Sección (E)

Índice de Explosión Interna de la Sección (E)	Categoría
0 – 1	Ligero
1 – 2,5	Bajo
2,5 – 4	Moderado
4 – 6	Alto
+6	Muy alto

Fuente: Plascencia (1995)

4. Cálculo del Índice de Explosión Aérea (A)

De un estudio de un gran número de escapes de sustancias inflamables que han dado lugar ya sea a explosiones aéreas o a nubes que han causado únicamente fuego por ignición, ha sido posible identificar un número de factores incluidos en el Índice de Mond y que pueden usarse para derivar el Índice A de Explosión Aérea que se calcula como se muestra a continuación:

$$A = B \left[1 + \frac{m}{100} \right] QHE \frac{t}{300} \left(\frac{1+p}{1000} \right) \quad (2.10)$$

Donde:

B: Factor material

m: factor de mezclado y dispersión

Q: Factor por Riesgos de cantidad de material

H: Altura de la unidad

E: Índice de Explosión Interna

t: temperatura del proceso (K)

p: Factor por alta presión

Tabla 2.12: Categorías asignadas para el Índice de Explosión Aérea (A)

Índice de Explosión Aérea (A)	Categoría
0 – 10	Ligero
10 – 30	Bajo
30 – 100	Moderado
100 – 500	Alto
+500	Muy alto

Fuente: Plascencia (1995)

5. Cálculo del Índice unitario de toxicidad (U)

Se calcula un índice unitario de Toxicidad (U) por la ecuación 2.11 de manera que represente la influencia de la toxicidad y consideraciones afines sobre el control y supervisión de la sección de la planta.

$$U = \frac{T}{100} \left[1 + \frac{M+P+S}{100} \right] \quad (2.11)$$

Tabla 2.13: Categorías asignadas a los valores del Índice Unitario de Toxicidad

Índice Unitario de Toxicidad (U)	Categoría
0 – 1	Ligero
1 – 3	Bajo
3 – 6	Moderado
6 – 10	Alto
+10	Muy alto

Fuente: Plascencia (1995)

6. Cálculo del Índice máximo incidente tóxico (C)

Usando una combinación del índice unitario de Toxicidad (U) y el Factor de Cantidad (Q), se obtiene el Índice del Máximo Incidente Tóxico (C) y se calcula como sigue:

$$C = Q \cdot U \quad (2.12)$$

Tabla 2.14: Categorías asignadas a los valores del Índice del Máximo Incidente Tóxico (C)

Índice del Máximo Incidente Tóxico (C)	Categoría
0 – 20	Ligero
20 – 50	Bajo
50 – 200	Moderado
200 – 500	Alto
+500	Muy Alto

Fuente: Plascencia (1995)

7. Cálculo del Índice Global de Riesgos (MOND) (R)

En la división MOND se ha visto que la magnitud global de riesgo a usarse cuando se considera el arreglo de equipo de una planta, debe tener mayor influencia de los siguientes factores que lo permitido en el Índice Global DOW/ICI. De acuerdo a lo anterior, se ha desarrollado una Magnitud Global de Riesgos (R), que maneja estos factores de manera más adecuada. Si uno de los factores tiene valor cero, se debe considerar un valor mínimo de 1 en esta ecuación:

$$R = D \left(1 + \sqrt{\frac{F \cdot U \cdot E \cdot A}{10^3}} \right) \quad (2.13)$$

Como diferentes niveles aceptables de riesgo global pueden ser apropiados según las circunstancias, la lista de valores del Factor Global de Riesgo (Tabla 2.15) a la mitad del rango se divide en dos conjuntos más pequeños: Alto (Grupo 1) y Alto (Grupo 2), ya que uno puede considerarse aceptable y el otro no.

Tabla 2.15: Categorías asignadas a los valores del Factor Global de Riesgo (R)

Factor Global de Riesgo (R)	Categoría
0 – 20	Suave
20 – 100	Bajo
100 – 500	Moderado
500 – 1 100	Alto (grupo 1) Aceptable
1 100 – 2 500	Alto (grupo 2) No Aceptable
2 500 – 12 500	Muy alto
12 500 – 65 000	Extremo
+65 000	Muy extremo

Fuente: Plascencia (1995)

- **Quinta Fase:** Determinación de los factores de bonificación.

Se considera que existen medidas especiales destinadas a la seguridad de los procesos y en esta fase se determinan los factores globales de bonificación K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5 y K_6 a través del producto de las bonificaciones que se presentan a continuación.

Tabla 2.16: Control de Riesgos Asociados a la Contención (K_1)

Riesgos Asociados a la Contención (K_1)	Rango	Factor
Tanques a presión	0.8 a 0.9	
Tanques verticales	0.8 a 0.9	
Tuberías de transferencia	0.6 a 0.9	
Otras barreras adicionales	0.45 a 0.9	
Detección y control de fugas	0.7 a 0.95	
Venteos de emergencia	0.9 a 0.95	
Factor de Bonificación por Contención (K_1)		II(factoros)

Fuente: Plascencia (1995)

Los factores de bonificación para el control de Riesgos Asociados al Control del Proceso (K_2), Control de Riesgos asociados a la Actitud con Respecto a la Seguridad (K_3), Control de Riesgos en la Protección Contra Incendio (K_4), Control de Riesgos por Aislamiento (K_5) y Control de Riesgos por la Lucha Contra Incendios (K_6) se pueden observar en el **Anexo 10** y se calculan de la misma forma, o sea, como una multiplicación de todos los factores de bonificación.

- **Sexta Fase:** Cálculo de Índices Corregidos.

Una vez definidos los factores de bonificación, entonces se procede a reducir los índices ya calculados por las siguientes ecuaciones:

Carga de Fuego Reducida.

$$F_2 = FK_1K_3K_5K_6 \quad (2.14)$$

Índice Reducido de Explosión.

$$E_2 = EK_2K_3 \quad (2.15)$$

Índice Reducido de Riesgo de Explosión Aérea.

$$A_2 = AK_1K_5K_6 \quad (2.16)$$

Índice Global de Riesgo Reducido.

$$R_2 = RK_1K_2K_3K_4K_5K_6 \quad (2.17)$$

En la Tabla 2.17 se puede observar los niveles máximos aceptables para cada uno de los riesgos.

Tabla 2.17: Niveles máximos de aceptabilidad de riesgos.

Riesgo	Nivel máximo aceptable	Nivel no aceptable de riesgo
Incendio (F)	Moderado	Alto
Explosión interna (E)	Moderado	Alto
Explosión aérea (A)	Moderado	Alto
Índice unitario de toxicidad (U)	Moderado	Alto
Índice máximo incidente tóxico (C)	Moderado	Alto
Factor Global de Riesgo (R)	Alto (Grupo 1)	Alto (Grupo 2)

Fuente: Plascencia (1995)

Capítulo 3: Análisis de resultados

En este capítulo se ofrecen los resultados del estudio de riesgos por incendio, explosión y toxicidad realizado en los tanques de almacenamiento y tratamiento en Planta de Procesamiento de Crudos. En el mismo se persigue comparar los resultados obtenidos a través del análisis de riesgo mediante las metodologías de los Índices de Incendio y Explosión (IFE) de Dow y de Incendio, Explosión y Toxicidad (MOND) de ICI y así de esta forma predecir la magnitud de los daños ambientales como consecuencia de los mismos.

3.1 Análisis y comparación de los resultados de los índices IFE de Dow y el MOND de ICI

Según los criterios expuestos en el capítulo anterior se han delimitado aquellas unidades de proceso que, por la naturaleza de las sustancias que se procesan y por las condiciones de operación, pueden contribuir al desarrollo de accidentes como los incendios. Se consideraron solo los tanques de tratamiento y almacenamiento ya que el desarrollo de la investigación se centra en estos; debido a que en ellos es donde se acumula la mayor cantidad de combustible y, por ende, son los que tienen mayor riesgo de incendio y explosión tienen.

Como resultado se obtienen 14 unidades de proceso para realizar el análisis de cada índice y están involucradas sustancias como el crudo, la nafta y el sulfuro de hidrógeno. En el **Anexo 6** se ofrece una tabla donde aparecen las unidades seleccionadas y las sustancias a las que se determinan el factor material porque representan un peligro en materia de incendio y explosión.

Una vez seleccionadas las unidades de proceso, se comienzan a desarrollar las metodologías del índice IFE y la del Mond para cada una de ellas por separado, según las etapas definidas en el capítulo anterior. Lo primero que se determina es el factor material, el cual es característico de cada sustancia y depende de la temperatura a la que se procesa en cada unidad.

Para el índice IFE de Dow, en el **Anexo 7** se muestra la tabla publicada por AIChE (1994) donde aparecen tabulados los valores del factor material para un gran número de sustancias y dentro de ellas están las que se procesan en la planta como el petróleo crudo, la nafta y el sulfuro de hidrógeno. Sin embargo, en la mayoría de las unidades, las sustancias poseen una temperatura de trabajo superior a los 60°C, por lo que no se puede obtener el valor directamente de esta tabla, sino que fue necesario hacer la rectificación del factor material siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo anterior donde se usan las tablas 2.1 y 2.3. Finalmente, el FM de la unidad será el factor material más alto encontrado en la misma.

Mientras que para el índice Mond, para que un material se seleccione como material clave, debe estar presente en tal magnitud que sea peligroso. A pesar de que el sulfuro de hidrógeno es quizás el elemento más tóxico se escoge como material clave el crudo, pues al ser más abundante, representa el mayor riesgo en la unidad.

Para el cálculo del factor material se utiliza la ecuación 2.5 que depende únicamente del calor de combustión del material clave a temperatura y presión atmosférica, este valor también aparece en el **Anexo 7**.

Unidad de proceso N° 1: Tanque 6

En el desarrollo de la metodología del IFE de Dow, el cálculo del factor material se lleva a cabo a partir de las sustancias presentes en dicha unidad de proceso las cuales son el petróleo crudo y el sulfuro de hidrógeno. En la siguiente tabla se muestran los resultados.

Tabla3.1: Resultados del cálculo del FM para el índice DOW.

Sustancias	Temperatura (°C)	FM
Petróleo crudo	70	21
Sulfuro de hidrógeno	30	21

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar ambas sustancias tienen igual factor material por lo que se selecciona el petróleo crudo debido a que es el que se encuentra en mayor cantidad en la planta.

En el caso del índice MOND, como se explica anteriormente se determina el factor material (B) para el crudo a través de la ecuación anterior y se obtiene un valor de 21, 225. Cabe destacar que este valor es el mismo para el resto de las unidades de proceso puesto que en el resto de los tanques la sustancia clave sigue siendo la misma, excepto en el caso de los tanques de nafta.

En ambas metodologías para los dos índices se calculan factores de penalización de riesgo, en el IFE se determinan los factores generales y especiales de riesgo, los cuales son F_1 y F_2 respectivamente; mientras que en el Mond estos factores se dividen en Riesgos especiales del material (M), Riesgos generales del proceso (P), Riesgos especiales del proceso (S), Riesgos de Cantidad (Q), Riesgos por arreglo del equipo (L) y Riesgos de Toxicidad (T).

Para aplicar las penalizaciones correspondientes a los riesgos propios de cada unidad se consultaron, además de las recomendaciones y gráficos de la metodología del IFE, las listas de comprobación ofrecidas por Casal (2001). También fue necesario el apoyo de los especialistas de la planta por su conocimiento y experiencia del proceso que se estudia.

Los factores de riesgos generales del proceso (F_1) y de riesgos especiales del proceso (F_2) se obtuvieron mediante la suma de aquellas penalizaciones que estaban presentes en cada uno de ellos en la unidad analizada. A continuación, se muestran los valores para la unidad de proceso N°1.

Tabla 3.2 Factores de riesgos generales para la unidad de proceso N°1.

Evaluación de Riesgos generales del proceso (F1)	Rango	Valor
Reacciones químicas Exotérmicas	0,3 a 1,25	0
Procesos Endotérmicos	0,2,	0
Manejo y Transferencia de materia	0,25 a 0,85	0,85
Unidades de proceso encerradas o interiores	0,3 a 0,9	0
Acceso en caso de fuego	0,2 a 0.35	0
Control de derrames y sistema de drenaje	0.5	0,5
	F1	1,35

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la tabla anterior se penaliza a esta unidad por el manejo y transferencia de materia ya que este aspecto tiene en cuenta el potencial para el fuego de esta unidad y además que en este tanque se almacena un material inflamable con alto riesgo de incendio y explosión. También se penaliza porque no cuentan con un adecuado sistema de drenaje, como la existencia de diferentes niveles en la superficie que faciliten la salida de sustancias en caso de derrame, esto posibilita la acumulación de combustibles en una zona y por tanto la probabilidad de ocurrencia de accidentes aumenta.

En la tabla 3.3 se muestran los resultados de los riesgos especiales del proceso (F_2).

Uno de los elementos más importantes de los que se aprecia en la tabla antes mencionada es la penalización por la cantidad de material inflamable debido a que en todos los tanques de la planta se almacena una cantidad relevante de combustible. Para el cálculo de esta penalidad se necesita el calor de combustión que aparece en AIChE (1994) y se muestra en el **Anexo 7**.

Tabla 3.3 Factores de riesgos especiales para la unidad de proceso N°1.

Riesgos Especiales del proceso (F2)	Rango	Valor
Material tóxico	0 a 0,1	0,2
Presión sub- atmosférica	0,5	0
Operación dentro o cerca de la temperatura de inflamación	0,3 a 0,8	0
Explosión de polvos	0,25 a 2	0
Alivio de presión	ecuac ó fig 2.2 metod	0
Baja temperatura		0
Cantidad de material inflamable	fig 2.3, 2.4 o 2.5	0,3
Corrosión y erosión	0,1 a 0,75	0,5
Fugas a través de Juntas y empaaduras	0,5 a 1,5	0,1
Uso de equipos con fuego	1 o fig 2,6	1
Sistemas de intercambio de calor con aceite caliente	0,15 a 1,15	0
Equipo rotativo	0,5	0
	F2	2,1

Fuente: Elaboración propia

En el caso de la penalidad por toxicidad del material se determinó según la expresión 2.1 a partir de los valores del factor de salud N_H de las sustancias (los valores de N_H se encuentran tabulados en AIChE, 1994 y se muestran también en el anexo mencionado anteriormente).

Para el índice Mond se determinan los riesgos especiales del material (M), los resultados se muestran en la tabla 3.4.

Tal y como se aprecia en la tabla 3.4 y al igual que en la tabla 3.2 de los riesgos generales del proceso en el índice Dow, no se penaliza por productos oxidantes debido a que en este tanque de tratamiento no se lleva a cabo ninguna reacción química, sino que exclusivamente se calienta el petróleo.

Tabla 3.4 Riesgos Especiales del material (M) para la unidad de proceso N°1.

RIESGOS ESPECIALES DEL MATERIAL (M)	RANGO	VALOR
Productos oxidantes	0 a 20	0
Dar lugar a gas combustible	0 a 30	0
Características de mezcla y dispersión (m)	-50 a 100	-20
Puede inflamarse espontáneamente	30 a 250	100
Puede polimerizarse espontáneamente	25 a 75	0
Sensibilidad a la ignición	-75 a 150	50
Puede dar descomposición explosiva	75 a 125	125
Puede dar lugar a detonación del gas	0 a 150	0
Propiedades de la fase condensada	200 a 1500	0
Otros	0 a 150	0
Factor de Riesgos Especiales del Material (M)		255

Fuente: Elaboración propia.

En este caso se penaliza por descomposición explosiva debido a que puede ocurrir una reacción acompañada por la liberación de gases calientes, que ocurre con suficiente rapidez para proporcionar una rápida explosión visible a cualquier observador.

Los resultados de los riesgos generales del proceso (P) se muestran en la tabla 3.5:

Como se va a apreciar en la tabla antes mencionada, solo se penaliza porque cuando un material que está siendo almacenado está caliente y tiene una fase acuosa separada, y/o el recipiente de almacenamiento está calentado con vapor, como el caso estudio, se usa un factor de 50.

Tabla 3.5 Riesgos generales del proceso (P) para la unidad de proceso N°1.

RIESGOS GENERALES DEL PROCESO (P)	RANGO	VALOR
Manipulación y cambios físicos	10 a 60	50
Características de la reacción	25 a 60	0
Reacción batch	10 a 60	0
Multiplicidad de reacciones	25 a 75	0
Desplazamiento del material	0 a 150	0
Contenedores transportables	10 a 100	0
Factor de Riesgos Generales del Proceso (P)		50

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de los riesgos especiales del proceso (S) se muestran en la tabla 3.6:

Tabla 3.6 Riesgos especiales del proceso (S) para la unidad de proceso N°1.

RIESGOS ESPECIALES DEL PROCESO (S)	RANGO	VALOR
Presión baja (P < 15 psia)	50 a 150	100
Presión alta (p)	0 a 150	0
Temperatura baja (CS 10 °C a -25°C)	0 a 30	0
Temperatura baja (CS a -25°C)	30 a 100	0
Temperatura baja (Otros materiales)	0 a 100	0
Temperatura alta (Material inflamable)	0 a 35	0
Temperatura alta (Resistencia del material)	0 a 100	0
Corrosión y erosión	0 a 400	100
Fugas por juntas y cierres	0 a 60	30
Vibración y fatiga	0 a 100	30
Proceso/Reacciones difíciles de controlar	20 a 300	0
Operación cerca/en el rango de inflamabilidad	25 a 450	50
Riesgo de explosión superior al valor medio	40 a 100	40
Riesgo de explosión por polvo o neblina	30 a 70	50
Oxidantes potentes	0 a 100	0
Sensibilidad del proceso a la ignición	0 a 400	25
Riesgo de electricidad estática	10 a 200	100
Factor de Riesgos Especiales del Proceso (S)		525

Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en esta tabla y al igual que en la tabla 3.3 de los riesgos especiales del proceso en el índice Dow, no se penaliza por altas presiones ya que los tanques operan a presión atmosférica y estas penalizaciones en ambos casos son para presiones mayores que la atmosférica. También fue común para todas las unidades la penalidad relacionada con la corrosión debido a que el petróleo crudo tiene en su composición sulfuros que a altas temperaturas causan corrosión, contiene sales que durante el calentamiento se hidrolizan y dan lugar a los ácidos correspondientes, el ácido clorhídrico es uno de los más importantes en este sentido.

También coincide en ambos índices las penalizaciones de fugas por juntas y cierres que pueden representar un problema, particularmente donde se tienen ciclos de temperaturas y de presión. Para uniones bridadas que llegaran a tener fugas regulares de menor cuantía, se usa un factor de 30. Además en las operaciones de llenado y vaciado donde se pueden introducir riesgos por vibración y fatiga cuando los cimientos u otros soportes de estructuras fijas, tales como tuberías, se debilitan por corrosión, abrasión, mal diseño en la cimentación, refuerzos de luz inadecuados,

entre otros, se asigna un factor de hasta 30 de acuerdo con las consecuencias que ocasione la falla.

Los resultados de los riesgos de cantidad (Q) se muestran en la tabla 3.7:

Tabla 3.7 Riesgos de cantidad (Q) para la unidad de proceso N°1.

RIESGOS ASOCIADO A LAS CANTIDADES (Q)	VALOR
Cantidad total de material (K) [t]	1 541.90
Factor de Cantidad (Q)	200.00

Fuente: Elaboración propia.

Como ya se analizó anteriormente la cantidad de material almacenado en cada unidad de proceso es uno de los aspectos más importantes de cada índice de riesgo ya que en ambos hay que penalizar en función de la cantidad de combustible que se exista en cada tanque.

Los resultados de los riesgos de cantidad (L) se muestran en la tabla 3.8:

Tabla 3.8 Riesgos por el arreglo del equipo (L) para la unidad de proceso N°1.

RIESGOS ASOCIADOS A LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA (L)		VALOR
Altura (H) [m]		7
Área de trabajo (N) [m ²]		300
	RANGO	VALOR
Diseño de la estructura	0 a 200	15
Efecto dominó	0 a 250	0
Bajo tierra	50 a 150	0
Superficie de drenaje	0 a 100	100
Otros	50 a 250	50
Factor de Riesgos asociados a la Distribución en Planta (L)		165

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en esta tabla se penaliza porque esta unidad no cuenta con un adecuado sistema de drenaje al igual que en el índice Dow que se penaliza por este mismo aspecto.

También esta unidad se penaliza por el diseño de su estructura ya que al tener una altura de 7 metros y contiene más de una tonelada de material inflamable almacenada en ella, se le da un valor de 15 y como dicha unidad se localiza a menos de 10 metros del cuarto de control principal se aplica un factor de 50.

Los resultados de los riesgos de toxicidad (T) se muestran en la tabla 3.9:

Tabla 3.9 Riesgos de toxicidad (T) para la unidad de proceso N°1.

RIESGOS DE TOXICIDAD (T)	RANGO	VALOR
Efectos sobre la piel	0 a 300	0
Efectos por inhalación	0 a 150	150
Factor de Riesgos de toxicidad (T)		150

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el índice Dow, en el Mond se penaliza por los efectos tóxicos de la sustancia clave como esta no se puede absorber por la piel, entonces solo se penalizan sus efectos por inhalación. A pesar de que el material clave es el crudo, el tanque también contiene gas en su interior que en caso de ruptura o explosión las personas que respiran esta atmósfera pueden experimentar síntomas que incluyen dolor de cabeza, mareos, inconsciencia, náuseas, vómitos y bajo determinadas circunstancias se puede producir la muerte, por ello se penaliza con el máximo valor posible.

El IFE como ya se ha dicho anteriormente es el producto del factor de riesgo del proceso F_3 por el FM de acuerdo a la ecuación 2.4. El cálculo del índice da una medida del deterioro probable que puede producirse en una unidad de proceso. Los factores que tributan al mismo tales como la temperatura y presión de operación y la cantidad de combustible; indican la magnitud y probabilidad de una liberación de combustible o energía debida a fallos de control, fallos o vibración de los equipos y fatiga de estos por tensión o corrosión.

El valor del IFE para el tanque 6 es de 59,54; el cual de acuerdo a la tabla 2.7 se encuentra dentro del rango de ligero, lo cual es un resultado aceptable porque este tanque no es de gran capacidad como otros tanques de almacenamiento.

El índice Mond calcula un IFE equivalente de Dow (D) el cual tiene un valor de 1 288,46; según la clasificación de este índice que se muestra en la tabla 2.9 este se encuentra en el rango de muy catastrófico, al compararlo con el valor del índice IFE son resultados muy diferentes al igual que las clasificaciones pero esto se debe a que el índice Mond para calcular el IFE equivalente tiene en cuenta el factor material, los riesgos especiales del material (M), los riesgos generales del proceso (P), los riesgos especiales del proceso (S), los riesgos asociados a las cantidades (Q), los riesgos asociados a la distribución de la planta (L) y los riesgos asociados a la toxicidad (T), mientras que el índice Dow no tiene todos estos aspectos en cuenta, solo tiene en cuenta el factor de riesgo del proceso y el factor material.

El cálculo del resto de los índices potenciales en el índice Mond se lleva a cabo a través de las ecuaciones 2.8 a la 2.13; las clasificaciones se obtienen de las tablas de la 2.10 a la 2.15 respectivamente. Los resultados se muestran en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8: Resultados del cálculo de los Índices de Riesgo Potencial.

Índices de Riesgo	Valor	Grado Total de Riesgo
Incendio (F)	2 236 333,21	Extremo
Explosión interna (E)	9,30	Muy Alto
Explosión aérea (A)	252,88	Alto
Índice unitario de toxicidad (U)	13,95	Muy Alto
Índice máximo incidente tóxico (C)	2 790,00	Muy Alto
Factor Global de Riesgo (R)	11 037 619,19	Muy Extremo

Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia, en todos los Índices existen variaciones en el Grado Total de Riesgo que van desde muy alto hasta muy extremo. Los índices U y C se clasifican como muy alto atendiendo al grado total de riesgo, lo cual es lógico pues el valor de uno siempre depende del otro. En estos índices los riesgos que más van a influir son los especiales de proceso y del material y los riesgos asociados a la toxicidad, este último se identifica tanto en condiciones anormales de proceso, como mantenimiento o procesos fuera de control o en incendios, o se encuentra continuamente como resultado de pequeñas fugas en juntas, empaques y en el venteo de los gases del proceso.

El índice de potencial de fuego (F) representa un riesgo extremo pues como se observa en la ecuación 2.8, este valor depende de la cantidad de material y este a su vez de la capacidad volumétrica. Como se trabaja con un tanque de gran tamaño entonces el riesgo de producirse un incendio devastador se incrementa.

Tanto el índice de Explosión Interna (E) como el de Explosión Aérea (A) se encuentran en la categoría muy alta y alta de riesgo respectivamente. En el primer caso se debe a la acción de los riesgos especiales del proceso y del material. En el caso de Explosión Aérea este depende de los riesgos asociados a las cantidades; así como de las temperaturas del proceso.

Por último, el valor del Factor Global de Riesgo es inadmisibles pues resulta muy extremo. Este valor es lógico si se tiene en cuenta que depende de los índices de riesgo analizados anteriormente y que en todos los casos ofrecen resultados alarmantes.

Posteriormente se procede a calcular los factores de bonificación para el Control de Riesgos Asociados a la Contención (K_1), el Control de Riesgos Asociados al Control del Proceso (K_2), el Control de Riesgos asociados a la Actitud con Respecto a la Seguridad (K_3), el Control de Riesgos en la Protección Contra Incendio (K_4), el Control de Riesgos por Aislamiento (K_5) y el Control de Riesgos por la Lucha Contra Incendios (K_6). Los rangos en que oscilan los mismos a la hora de bonificar se pueden observar en el **Anexo 10**.

Primeramente, las bonificaciones por sistemas de contención (K_1) están referidas a la reducción de riesgo como consecuencia de cualquier mejora en el diseño estándar de los recipientes a presión y sistemas de tubería y protección de estos contra daño accidental, incluyendo los procedimientos de mantenimiento y modificaciones. Los sistemas de detección de fugas que puedan advertir de un escape de material, si el equipo está protegido adecuadamente contra sobrepresión interna y también si el material venteado o de desecho se envía a lugares seguros. Las fallas del sistema de contención se indican por fugas del contenido de la atmósfera.

Como se puede apreciar en el **Anexo 11** en el caso del factor de bonificación K_1 se bonifican los recipientes a presión con un factor de 0,8. También se bonifica el tercer caso debido a que el material empleado para la construcción del sistema de tuberías es altamente resistente. Cuando un recipiente de almacenamiento que contiene líquidos inflamables o tóxicos (o gas licuado bajo condiciones totales o parciales de refrigeración) se provee con una segunda pared de contención (para presión atmosférica), que se construye a todo lo largo del recipiente, se le asigna un factor de 0,45. La unidad bonifica lo relativo a la detección de fugas, ya que los operadores en el cuarto de control son capaces de lograr el aislamiento y la efectiva despresurización por medio de válvulas accionadas remotamente; en correspondencia con el venteo de emergencia, todo el material gaseoso se envía a quemadores.

Para el caso del Factor de Bonificación por Control del Proceso (K_2) se debe tener en cuenta todo lo referido a alarmas y/o sistemas de paro de seguridad activados por condiciones anormales específicas de proceso.

Los factores especiales tales como sistemas de enfriamiento de emergencia para el proceso, suministro de energía de emergencia para operaciones vitales (como unidades de refrigeración, agitadores y bombas) y sistemas de gas inerte, están claramente relacionados con el control de procesos bajo condiciones anormales y constituyen frecuentemente un factor esencial para cualquier sistema de paro de seguridad. La instalación de equipo de supresión de explosión,

equipo diseñado para resistirlo o equipo de venteo seguro para explosiones internas, también son parte importante del sistema de control de procesos.

Como se cuenta con sistema de alarma capaz de identificar condiciones anormales específicas del proceso que representan situaciones peligrosas, con generadores de emergencia como el caso de los grupos electrógenos y sistema de enfriado de emergencia capaces de operar alrededor de 10 minutos luego de ocurrir un evento indeseable. Con relación al estudio de actividades peligrosas se designa un factor de acuerdo al tiempo y al personal con experiencia disponible para el estudio de riesgos. Se utiliza un factor de 0,85 para las paradas de seguridad, en la empresa se duplican las funciones de disparo de manera que una condición anormal iniciará el paro completo de la planta. Si la planta está controlada por computadora en línea directamente a los controles y monitores de flujo de proceso, de manera que continuamente se toman acciones correctivas, se logra generalmente una operación más uniforme que con instrumentación o control manual. Como el tanque está provisto de instrumentos de relevo de sobrepresión o de venteo de explosión (en el caso de riesgo de explosión interna) adecuados para protegerlo de condiciones anormales previsibles, se selecciona un factor entre 0,95 y 0,85 de acuerdo a la eficacia de los instrumentos de relevo de sobrepresión.

Como la planta se encuentra normalmente patrullada a todas horas del día y de la noche y se puede tener una buena vigilancia del equipo principal y además es posible ponerse en contacto con todos los operadores por medio de radio u otro medio equivalente, desde el cuarto de control, también se bonifica este acápite.

Teniendo en cuenta esto, se bonifican cada uno de los factores como se muestra en el **Anexo 11**. En el caso del Factor de Bonificación por Actitud por la Seguridad (K_3) se asignan factores de bonificación como se muestran en el anexo antes mencionado. El resultado de fomentar la seguridad se ve en aumento en el nivel de entrenamiento de todo el personal, la adhesión o procedimientos de operación establecidos, buenas normas de mantenimiento, la aplicación correcta de sistemas de aprobación a las modificaciones y permisos de trabajo, verificaciones regulares y eficientes de todos los sistemas de seguridad y control y un informe de circunstancias anormales, fallas y accidentes menores. Además, la empresa lleva a cabo un programa de entrenamiento sobre seguridad que incluye a todos los operadores, personal administrativo y auxiliar.

Lo mismo ocurre con el Factor de Bonificación por Protección Física Contra Fuegos (K_4), donde la medida más importante para reducir el riesgo es asegurarse de que las estructuras y recipientes de

la sección estén provistos de protección efectiva contra el fuego, así como contar con cortinas de agua o vapor, paredes resistentes a fuego, pisos sólidos, que eviten que se propague el fuego y el humo. Las bonificaciones de cada uno de los caracteres se muestran en el anexo anteriormente mencionado.

En el caso del Factor de Bonificación por Aislamiento del Material (K_5) muchos incidentes producen fuegos mayores porque no es posible cortar el flujo de material hacia la sección cuando se inicia el suceso. El contar con válvulas de relevo, es una medida que puede controlar el incidente en su inicio, un sistema de relevo de emergencia garantiza un factor como se muestra en el anexo mencionado anteriormente. En el caso de ocurrir una fuga de material, el sistema de ventilación pueda ser accionado a control remoto para reducir el peligro.

Por último, se analizan los Factores de Bonificación por Lucha contra Incendios (K_6). Bajo esta categoría se agrupan los diversos tipos de sistemas de inundación y rociadores con agua, suministro adecuado de agua contra incendio, disponibilidad de brigadas y equipo, espuma y otros materiales especiales para combatir incendios y sistemas de alarma o comunicación (Ver anexo 11). De acuerdo con esto, el primer factor de reducción corresponde a sistemas de alarmas que cubran toda la sección y que sirven para pedir ayuda. Se aplica un factor de 0,9 cuando están instalados y llaman directamente a brigadas locales o municipales. Además, la planta cuenta en todo momento con suficientes extintores, suministro y rociadores de agua. Los incisos que no fueron mencionados no son aplicables a la planta estudio; por tanto, obtienen una bonificación correspondiente a la unidad.

Es necesario destacar que el análisis de estos factores de bonificación solo se le realiza a esta unidad de proceso porque en todas las demás que se analizan se bonifican con los mismos valores y por tanto se obtienen los mismos resultados.

En el caso del índice Dow existen también factores de bonificación (C_1 , C_2 y C_3) que son muy similares a los analizados anteriormente, puesto que en muchos de los casos hay aspectos que coinciden lo que con diferentes rangos; por lo que dichos factores son calculables, pero no es de interés hacerlo puesto que el objetivo de este proyecto es solo comparar los resultados obtenidos por cada índice y no analizar la parte económica del índice Dow, que es para lo que se utilizan las bonificaciones (C_1 , C_2 y C_3).

La fase final del índice Mond es el cálculo de los índices corregidos donde con ayuda de las bonificaciones que se determinaron anteriormente, se corrigen los índices F, E, A y R. Para ello se usan las ecuaciones 2.14, 2.15, 2.16 y 2.17. Los resultados se pueden observar en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9: Índices corregidos.

Índices	Valor inicial	Valor actual	RPD (%)	Categoría
Incendio (F)	2 236 333,21	28 436,22	98,7	Ligero
Explosión interna (E)	9,30	1,24	86,6	Bajo
Explosión Aérea (A)	252,88	4,21	98,3	Ligero
Factor Global de Riesgo (R)	59 935,82	107,59	99,8	Moderado

Fuente: Elaboración propia

RPD: diferencia porcentual relativa de reducción

Como se puede observar los índices F, E, A y R se reducen entre un 87 y 99%, de forma tal que no representan un peligro para la unidad ni amenaza para el personal que allí radica, siempre y cuando se cumplan con todos los protocolos de seguridad establecidos y se utilicen los medios de protección necesarios.

No obstante, el índice máximo de accidente tóxico (C) no se corrige a partir de las bonificaciones que se añaden al incluir los sistemas de seguridad y protección. Por esta razón se debe mantener que, aunque según el índice de riesgo global de Mond (R), la unidad estudiada presenta un nivel de riesgo de operación aceptable, se debe mantener extremo cuidado en mantener todos los sistemas de seguridad funcionando en estado óptimo, se debe realizar el mantenimiento adecuado en el tiempo programado y la preparación del personal de la planta debe estar rigurosamente al día. El riesgo de accidente tóxico existe, es muy alto y está latente. Depende de los operadores y tecnólogos de la planta de procesamiento de crudo reducir su posibilidad de ocurrencia.

Cabe destacar que de haber calculados los factores de bonificación para el índice Dow también se hubieran reducido debido que ambas bonificaciones para los dos índices consideran prácticamente los mismos aspectos, lo que con rangos diferentes.

Unidades de proceso N° 2 y N° 3: Tanque 7 y 8

Se analizan estas dos unidades de proceso unidas porque ambos tanques tienen la misma capacidad y las mismas características, como altura, diámetro y área de trabajo.

En el desarrollo de la metodología del índice IFE de Dow la sustancia que se encuentra presente en ambos tanques es el petróleo crudo a una temperatura de 85°C por lo que el factor material es 21 y en el caso del índice Mond el valor es de 21,225.

Como parte de la metodología del IFE de Dow se calculan los riesgos generales del proceso (F_1) y los riesgos especiales (F_2), En el **Anexo 12** aparecen los resultados de dichos riesgos para estas dos unidades de proceso. Consecutivamente como parte de la metodología del Mond se calculan también los riesgos especiales del material (M), los riesgos generales del proceso (P), los riesgos especiales del proceso (S), los riesgos asociados a las cantidades (Q), los riesgos asociados a la distribución en la planta (L) y los riesgos de toxicidad (T). Los resultados de los riesgos antes mencionados se muestran en el **Anexo 13**, también para las unidades de proceso que están siendo analizadas.

En ambos índices se penalizan estas unidades de proceso por el manejo y transferencia de materia ya que en este aspecto se tiene en cuenta que en estos tanques se almacena una sustancia inflamable con riesgo de incendio y explosión. Además, se penalizan también porque no cuentan con un sistema de drenaje adecuado en caso de derrame.

Tanto de los riesgos especiales del proceso como los de cantidad (Q), de los índices Dow y Mond respectivamente se penaliza por cantidad de material inflamable debido a que en estos tanques se almacenan $9\ 500\ m^3$ en cada uno, para esta penalización se necesita la densidad del crudo y el calor de combustión para hacer las transformaciones necesarias y de este modo determinar el valor de la penalización para cada índice.

En el caso de los riesgos especiales del proceso y los riesgos por toxicidad de los dos índices indistintamente se penalizan, en el caso del IFE por toxicidad del material a partir de N_H y en el caso del Mond se penaliza por los efectos tóxicos que puede llegar a tener el petróleo crudo.

En ambos índices coinciden las penalizaciones de fugas por junta y cierres, también en el caso de llenado y vaciado donde se pueden introducir riesgos por vibración y fatiga.

De igual forma también coinciden aspectos en ambas metodologías de los dos índices que no se penalizan como es el caso de las reacciones químicas ya que ni en estos tanques ni en ningún otro se produce una reacción química, sino únicamente el tratamiento del petróleo. Tampoco incluye penalización el aspecto de altas presiones en ambos índices, debido a que ambas unidades operan a presión atmosférica y esta penalización es para cuando la presión de operación es mayor que 1atm.

Todo este análisis se puede apreciar en los anexos 12 y 13.

Posteriormente en la metodología del IFE de Dow se calcula el valor del índice IFE para los tanques 7 y 8, este da un valor de 68,6, el cual se encuentra dentro del rango de moderado.

El índice Mond calcula un IFE equivalente, el cual para ambas unidades de proceso tiene un valor de 1 435,39 y se encuentra dentro del rango de muy catastrófico. Al comparar este valor tanto en número como en clasificación se aprecia que son diferentes y esto se debe a que Mond para el cálculo del IFE equivalente se basa desde el factor material hasta en los riesgos de toxicidad, mientras que Dow no tiene en cuenta este número de aspectos a la hora de calcular el índice IFE.

En la tabla 3.10 se muestran los cálculos de los restantes índices potenciales; así como, sus clasificaciones.

Tabla 3.10: Resultados del cálculo de los Índices de Riesgo Potencial.

Índices de Riesgo	Valor	Grado Total de Riesgo
Incendio (F)	2 862 880,95	Extremo
Explosión interna (E)	9,30	Muy Alto
Explosión aérea (A)	746,55	Muy Alto
Índice unitario de toxicidad (U)	13,95	Muy Alto
Índice máximo incidente tóxico (C)	4 603,5	Muy Alto
Factor Global de Riesgo (R)	23 903 257,8	Muy Extremo

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, en todos los Índices existen variaciones en el Grado Total de Riesgo que van desde muy alto hasta muy extremo. El índice potencial de fuego (F) representa un riesgo extremo debido a que este depende de la cantidad de material y este a su vez del volumen del tanque, así como también depende del área de trabajo como del factor material.

Los índices de Explosión Interna y el de Explosión Aérea se encuentran en la clasificación de muy alta; en el primer caso se debe a que este depende de los riesgos generales del proceso y del material, en el otro caso se debe a que este depende a los riesgos de cantidad; así como, de la temperatura y la presión. El valor del Factor Global de Riesgo se clasifica como muy extremo, lo cual es un valor lógico y consecuente debido a que este depende de todos los índices de riesgo analizados anteriormente.

Luego en la metodología del Mond se calculan los factores de bonificación K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5 y K_6 .

Como se mencionó en el análisis de la unidad de proceso anterior, los resultados de dichos factores de bonificación se muestran en el anexo indicado en la unidad de proceso anterior; puesto que son los mismos en todos los tanques.

En el caso de las bonificaciones del índice Dow, el análisis es el mismo que en la unidad de proceso anterior y que en el resto de las unidades; es por ello que no se volverá a analizar en las restantes unidades de proceso.

En la tabla 3.11 se muestran los resultados del cálculo de los índices corregidos.

Tabla 3.11: Índices corregidos.

Índices	Valor inicial	Valor actual	RPD (%)	Categoría
Incendio (F)	2 862 880,95	36 403,12	98,7	Ligero
Explosión interna (E)	9,30	1,24	86,6	Bajo
Explosión Aérea (A)	746,55	12,43	98,3	Bajo
Factor Global de Riesgo (R)	128 450,31	230,59	99,8	Moderado

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar los índices F, E, A y R se reducen entre un 87 y 99%, de forma tal que no representan un peligro para la unidad ni amenaza para el personal que allí radica, siempre y cuando se cumplan con todos los protocolos de seguridad establecidos y se utilicen los medios de protección necesarios.

No obstante, el índice máximo de accidente tóxico (C) no se corrige a partir de las bonificaciones que se añaden al incluir los sistemas de seguridad y protección. Por esta razón se debe mantener que, aunque según el índice de riesgo global de Mond (R), la unidad estudiada presenta un nivel de riesgo de operación aceptable, se debe mantener extremo cuidado en mantener todos los sistemas de seguridad funcionando en estado óptimo.

Cabe destacar que de haber calculados los factores de bonificación para el índice Dow también se hubieran reducido debido que ambas bonificaciones para los dos índices consideran prácticamente los mismos aspectos, lo que con rangos diferentes. Esto ocurre en todos en las restantes unidades de proceso por lo que no se volverá a analizar.

Unidad de proceso N° 4: Tanque 14

En el desarrollo de la metodología del índice IFE de Dow la sustancia que se encuentra presente en ambos tanques es el petróleo crudo a una temperatura de 85°C por lo que el factor material es 21 y en el caso del índice Mond el valor es de 21,225.

Como parte de la metodología del IFE de Dow se calculan los riesgos generales del proceso (F_1) y los riesgos especiales (F_2), En el **Anexo 14** aparecen los resultados de dichos riesgos para esta unidad de proceso. Consecutivamente como parte de la metodología del Mond se calculan también los riesgos especiales del material (M), los riesgos generales del proceso (P), los riesgos especiales del proceso (S), los riesgos asociados a las cantidades (Q), los riesgos asociados a la distribución en la planta (L) y los riesgos de toxicidad (T). Los resultados de los riesgos antes mencionados se muestran en el **Anexo 15**, también para las unidades de proceso que están siendo analizadas.

Como se puede apreciar en los anexos mencionados anteriormente, tanto de los riesgos especiales del proceso como los de cantidad (Q), de los índices Dow y Mond respectivamente se penaliza por cantidad de material inflamable debido a que en este tanque se almacena 18 500 m³.

Cabe destacar que este es el tanque de mayor capacidad de todos los que se han analizado y de los que restan por analizar, por lo que es en el que mayor penalización de factor de cantidad se obtiene.

Como se puede apreciar tanto en los riesgos generales de proceso como en los del proceso (P) se penaliza a esta unidad por la manipulación ya que este aspecto tiene en cuenta el potencial para el fuego de esta unidad y además que en este tanque se almacena un material inflamable con alto riesgo de incendio y explosión.

También se penalizan ambos índices porque el tanque 14 no cuenta con un adecuado sistema de drenaje, como la existencia de diferentes niveles en la superficie que faciliten la salida de sustancias en caso de derrame, esto posibilita la acumulación de combustibles en una zona y por tanto la probabilidad de ocurrencia de accidentes aumenta.

En el caso de los riesgos especiales del proceso y los riesgos por toxicidad de los dos índices indistintamente se penalizan, en el caso del IFE por toxicidad del material a partir de N_H y en el caso del Mond se penaliza por los efectos tóxicos que puede llegar a tener el petróleo crudo.

Cabe aclarar que no se penalizan en ninguno de los dos índices por altas presiones puesto que el tanque es atmosférico, ni tampoco por productos oxidantes ya que en esta unidad de proceso no ocurre ninguna reacción química, ni endotérmica ni tampoco exotérica.

En todo es análisis expuesto con anterioridad, se pueden apreciar los valores en los anexos 14 y 15.

Posteriormente en la metodología del IFE de Dow se calcula el valor del índice IFE para el tanque 14, este da un valor de 69,46, el cual se encuentra dentro del rango de moderado.

El índice Mond calcula un IFE equivalente, el cual esta unidad de proceso tiene un valor de 1 548,42 y se encuentra dentro del rango de muy catastrófico. Al comparar este valor tanto en número como en clasificación se aprecia que son diferentes y esto se debe a que Mond para el cálculo del IFE equivalente tiene en cuenta el factor material, los riesgos especiales del material (M), los riesgos generales del proceso (P), los riesgos especiales del proceso (S), los riesgos asociados a las cantidades (Q), los riesgos asociados a la distribución de la planta (L) y los riesgos asociados a la toxicidad (T), mientras que el índice Dow no tiene todos estos aspectos en cuenta, solo tiene en cuenta el factor de riesgo del proceso y el factor material.

En la tabla 3.12 se muestran los cálculos de los restantes índices potenciales; así como, sus clasificaciones.

Tabla 3.12: Resultados del cálculo de los Índices de Riesgo Potencial.

Índices de Riesgo	Valor	Grado Total de Riesgo
Incendio (F)	3 305 101,94	Extremo
Explosión interna (E)	9,30	Muy Alto
Explosión aérea (A)	969,13	Muy Alto
Índice unitario de toxicidad (U)	13,95	Muy Alto
Índice máximo incidente tóxico (C)	5 998,50	Muy Alto
Factor Global de Riesgo (R)	31 566 132,54	Muy Extremo

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla anterior el índice potencial de fuego (F), según el grado total de riesgo representa un riesgo extremo, esto se debe a que este depende de la cantidad de material y como el tanque que se está analizando es el de mayor capacidad de la planta, entonces el riesgo de producirse un incendio destructor se incrementa.

Los índices U y C se clasifican según el grado total de riesgo, como muy alto, lo cual es aceptable porque el valor de uno depende del otro.

Tanto el índice E como el A se encuentran en la categoría de muy alta, en el caso del primero se debe a los riesgos especiales del proceso y del material y en segundo caso, este depende a los riesgos asociados a las cantidades y en este caso este tanque tiene gran capacidad.

El valor del factor global de riesgo es muy elevado y se clasifica como muy extremo, lo cual es un resultado lógico porque este depende de los índices analizados anteriormente.

Luego en la metodología del Mond se calculan los factores de bonificación K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5 y K_6 .

La fase final del índice Mond es el cálculo de los índices corregidos donde con ayuda de las bonificaciones que se determinaron anteriormente, se corrigen los índices F, E, A y R. Para ello se usan las ecuaciones 2.14, 2.15, 2.16 y 2.17. Los resultados se pueden observar en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13: Índices corregidos.

Índices	Valor inicial	Valor actual	RPD (%)	Categoría
Incendio (F)	3 305 101,94	39 554,08	98,8	Ligero
Explosión interna (E)	9,30	1,24	86,6	Bajo
Explosión Aérea (A)	969,13	15,19	98,4	Bajo
Factor Global de Riesgo (R)	154 703,14	261,38	99,8	Moderado

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar los índices F, E, A y R se reducen entre un 87 y 99%, de forma tal que no representan un peligro para la unidad ni amenaza para el personal que allí radica, siempre y cuando se cumplan con todos los protocolos de seguridad establecidos y se utilicen los medios de protección necesarios.

Unidades de proceso N° 5 y N°6: Tanques 15 y 16.

Se analizan estas dos unidades de proceso unidas porque estos tanques tienen la misma capacidad y las mismas características, como altura, diámetro y área de trabajo.

En el desarrollo de la metodología del índice IFE de Dow la sustancia que se encuentra presente en ambos tanques es el petróleo crudo a una temperatura de 85°C por lo que el factor material es 21 y en el caso del índice Mond el valor es de 21,225.

Como parte de la metodología del IFE de Dow se calculan los riesgos generales del proceso (F_1) y los riesgos especiales (F_2), En el **Anexo 16** aparecen los resultados de dichos riesgos para estas dos unidades de proceso. Consecutivamente como parte de la metodología del Mond se calculan también los riesgos especiales del material (M), los riesgos generales del proceso (P), los riesgos especiales del proceso (S), los riesgos asociados a las cantidades (Q), los riesgos asociados a la distribución en la planta (L) y los riesgos de toxicidad (T). Los resultados de los riesgos antes mencionados se muestran en el **Anexo 17**, también para las unidades de proceso que están siendo analizadas.

En ambos índices se penalizan estas unidades de proceso por el manejo y transferencia de materia ya que en este aspecto se tiene en cuenta que en estos tanques se almacena una sustancia inflamable con riesgo de incendio y explosión. Además, se penalizan también porque no cuentan con un sistema de drenaje adecuado en caso de derrame.

En los anexos mencionados con anterioridad se puede apreciar que, tanto los riesgos especiales del proceso como los de cantidad (Q), de los índices Dow y Mond respectivamente se penaliza por cantidad de material inflamable debido a que en estos tanques se almacenan $3\ 690\ m^3$ en cada uno, para esta penalización se necesita la densidad del crudo y el calor de combustión para hacer las transformaciones necesarias y de este modo determinar el valor de la penalización para cada índice.

En el caso de los riesgos especiales del proceso y los riesgos por toxicidad de los dos índices indistintamente se penalizan, en el caso del IFE por toxicidad del material a partir de N_H y en el caso del Mond se penaliza por los efectos tóxicos que puede llegar a tener el petróleo crudo.

En ambos índices coinciden las penalizaciones de fugas por junta y cierres, también en el caso de llenado y vaciado donde se pueden introducir riesgos por vibración y fatiga.

De igual forma también coinciden aspectos en ambas metodologías de los dos índices que no se penalizan como es el caso de las reacciones químicas ya que ni en estos tanques ni en ningún otro se produce una reacción química, sino únicamente el tratamiento del petróleo. Tampoco incluye penalización el aspecto de altas presiones en ambos índices, debido a que ambas unidades operan a presión atmosférica y esta penalización es para cuando la presión de operación es mayor que $1\ atm$ (Ver anexos 16 y 17).

Posteriormente en la metodología del IFE de Dow se calcula el valor del índice IFE para los tanques 15 y 16, este da un valor de 68,04; el cual se encuentra dentro del rango de moderado según la tabla 2.7 de la metodología de este propio índice.

El índice Mond calcula un IFE equivalente, el cual para ambas unidades de proceso tiene un valor de 1 333,67 y se encuentra dentro del rango de muy catastrófico. Al comparar este valor tanto en número como en clasificación se aprecia que son diferentes y esto se debe a que Mond para el cálculo del IFE equivalente se basa desde el factor material hasta en los riesgos de toxicidad, mientras que Dow no tiene en cuenta este número de aspectos a la hora de calcular el índice IFE. En la tabla 3.14 se muestran los cálculos de los restantes índices potenciales; así como, sus clasificaciones.

Tabla 3.14: Resultados del cálculo de los Índices de Riesgo Potencial.

Índices de Riesgo	Valor	Grado Total de Riesgo
Incendio (F)	2 363 913,92	Extremo
Explosión interna (E)	9,30	Muy Alto
Explosión aérea (A)	540,68	Muy Alto
Índice unitario de toxicidad (U)	13,95	Muy Alto
Índice máximo incidente tóxico (C)	3 348,00	Muy Alto
Factor Global de Riesgo (R)	17 175 096,74	Muy Extremo

Fuente: Elaboración propia

Los índices de Explosión Interna y el de Explosión Aérea se encuentran en la clasificación de muy alta; en el primer caso se debe a que este depende de los riesgos generales del proceso y del material, en el otro caso se debe a que este depende a los riesgos de cantidad; así como de la temperatura y la presión. El valor del Factor Global de Riesgo se clasifica como, muy extremo, lo cual es un valor lógico y consecuente debido a que este depende de todos los índices de riesgo analizados anteriormente.

Luego en la metodología del Mond se calculan los factores de bonificación K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5 y K_6 .

En la tabla 3.15 se muestran los resultados del cálculo de los índices corregidos.

Como se puede observar en la tabla antes mencionada los índices F, E, A y R se reducen entre un 87 y 99%, de forma tal que no representan un peligro para la unidad ni amenaza para el personal que allí radica, siempre y cuando se cumplan con todos los protocolos de seguridad establecidos y se utilicen los medios de protección necesarios.

Tabla 3.15: Índices corregidos.

Índices	Valor inicial	Valor actual	RPD (%)	Categoría
Incendio (F)	2 363 913,92	30 058,48	98,7	Ligero
Explosión interna (E)	9,30	1,24	86,6	Bajo
Explosión Aérea (A)	540,68	9,01	98,3	Ligero
Factor Global de Riesgo (R)	92 595,51	166,22	99,8	Moderado

Fuente: Elaboración propia

No obstante, el índice máximo de accidente tóxico (C) no se corrige a partir de las bonificaciones que se añaden al incluir los sistemas de seguridad y protección. Por esta razón se debe mantener que, aunque según el índice de riesgo global de Mond (R), la unidad estudiada presenta un nivel de riesgo de operación aceptable, se debe mantener extremo cuidado en mantener todos los sistemas de seguridad funcionando en estado óptimo.

Unidades de proceso N° 7, N°8, N°9 y N°10: Tanques 101, 102, 103 y 104.

Se analizan estas unidades de proceso unidas porque todos estos tanques tienen la misma capacidad y las mismas características, como altura, diámetro y área de trabajo.

En el desarrollo de la metodología del índice IFE de Dow la sustancia que se encuentra presente en ambos tanques es el petróleo crudo a una temperatura de 80°C por lo que el factor material es 21 y en el caso del índice Mond el valor es de 21,225.

Como parte de la metodología del IFE de Dow se calculan los riesgos generales del proceso (F₁) y los riesgos especiales (F₂), En el **Anexo 18** aparecen los resultados de dichos riesgos para estas dos unidades de proceso. Consecutivamente como parte de la metodología del Mond se calculan también los riesgos especiales del material (M), los riesgos generales del proceso (P), los riesgos especiales del proceso (S), los riesgos asociados a las cantidades (Q), los riesgos asociados a la distribución en la planta (L) y los riesgos de toxicidad (T). Los resultados de los riesgos antes mencionados se muestran en el **Anexo 19**, también para las unidades de proceso que están siendo analizadas.

En ambos índices se penalizan estas unidades de proceso por el manejo y transferencia de materia. Además se penalizan también porque no cuentan con un sistema de drenaje adecuado en caso de derrame.

Como se puede apreciar en los anexos antes mencionados, tanto de los riesgos especiales del proceso como los de cantidad (Q), de los índices Dow y Mond respectivamente se penaliza por cantidad de material inflamable, para esta penalización se necesita la densidad del crudo y el calor de combustión para hacer las transformaciones necesarias y de este modo determinar el valor de la penalización para cada índice.

En el caso de los riesgos especiales del proceso y los riesgos por toxicidad de los dos índices indistintamente se penalizan por efectos de toxicidad.

En ambos índices coinciden las penalizaciones de fugas por junta y cierres, también en el caso de llenado y vaciado donde se pueden introducir riesgos por vibración y fatiga.

De igual forma también coinciden aspectos en ambas metodologías de los dos índices que no se penalizan como el caso de las reacciones químicas ya que ni en estos tanques ni en ningún otro se produce una reacción química, sino solamente el tratamiento del petróleo. Tampoco incluye penalización el aspecto de altas presiones en ambos índices, debido a que ambas unidades operan a presión atmosférica y esta penalización es para cuando la presión de operación es mayor que 1atm. Todo esto se puede apreciar en los anexos 18 y 19.

Posteriormente en la metodología del IFE de Dow se calcula el valor del índice IFE para los tanques 101.102, 103 y 104, este da un valor de 68,18; el cual se encuentra dentro del rango de moderado.

El índice Mond calcula un IFE equivalente, el cual para estas unidades de proceso tiene un valor de 1 322,37 y se encuentra dentro del rango de muy catastrófico. Al comparar este valor tanto en número como en clasificación se aprecia que son diferentes y esto se debe a que Mond para el cálculo del IFE equivalente se basa desde el factor material hasta en los riesgos de toxicidad, mientras que Dow no tiene en cuenta estos aspectos a la hora de calcular el índice IFE.

En la tabla 3.16 se muestran los cálculos de los restantes índices potenciales así como sus clasificaciones.

Tabla 3.16: Resultados del cálculo de los Índices de Riesgo Potencial.

Índices de Riesgo	Valor	Grado Total de Riesgo
Incendio (F)	3 163 490,63	Extremo
Explosión interna (E)	9,30	Muy Alto
Explosión aérea (A)	525,03	Muy Alto
Índice unitario de toxicidad (U)	13,95	Muy Alto
Índice máximo incidente tóxico (C)	3 208,50	Muy Alto
Factor Global de Riesgo (R)	19 412 747,6	Muy Extremo

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, en todos los Índices existen variaciones en el Grado Total de Riesgo que van desde muy alto hasta muy extremo. El resto de los análisis es igual que el de las unidades de proceso anteriores.

Luego en la metodología del Mond se calculan los factores de bonificación K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5 y K_6 .

En la tabla 3.17 se muestran los resultados del cálculo de los índices corregidos.

Tabla 3.17: Índices corregidos.

Índices	Valor inicial	Valor actual	RPD (%)	Categoría
Incendio (F)	3 163 490,63	40 225,54	98,7	Ligero
Explosión interna (E)	9,30	1,24	86,6	Bajo
Explosión Aérea (A)	525,03	8,74	98,3	Ligero
Factor Global de Riesgo (R)	104 475,20	187,55	99,8	Moderado

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar los índices F, E, A y R se reducen entre un 87 y 99%, de forma tal que no representan un peligro para la unidad ni amenaza para el personal que allí radica, siempre y cuando se cumplan con todos los protocolos de seguridad establecidos y se utilicen los medios de protección necesarios.

Unidades de proceso N° 11, N°12, N°13 y N°14: Tanques 701, 702, 703 y 704.

Se analizan estas unidades de proceso unidas porque todos estos tanques tienen la misma capacidad y las mismas características, como altura, diámetro y área de trabajo.

Como parte de la metodología del IFE de Dow se calculan los riesgos generales del proceso (F_1) y los riesgos especiales (F_2), En el **Anexo 20** aparecen los resultados de dichos riesgos para estas dos unidades de proceso. Consecutivamente como parte de la metodología del Mond se calculan también los riesgos especiales del material (M), los riesgos generales del proceso (P), los riesgos especiales del proceso (S), los riesgos asociados a las cantidades (Q), los riesgos asociados a la distribución en la planta (L) y los riesgos de toxicidad (T). Los resultados de los riesgos antes mencionados se muestran en el **Anexo 21**, también para las unidades de proceso que están siendo analizadas.

Como se puede apreciar en los anexos 20 y 21, tanto los riesgos especiales del proceso como los de cantidad (Q), de los índices Dow y Mond respectivamente se penaliza por cantidad de material inflamable debido a que en estos tanques se almacenan 190 m^3 en cada uno, para esta penalización se necesita la densidad del crudo y el calor de combustión para hacer las transformaciones necesarias y de este modo determinar el valor de la penalización para cada índice.

En ambos índices se penalizan estas unidades de proceso por el manejo y transferencia de materia ya que en este aspecto se tiene en cuenta que en estos tanques se almacena una sustancia inflamable con riesgo de incendio y explosión. Además se penalizan también porque no cuentan con un sistema de drenaje adecuado en caso de derrame.

En el caso de los riesgos especiales del proceso y los riesgos por toxicidad de los dos índices indistintamente se penalizan, en el caso del IFE por toxicidad del material a partir de N_H y en el caso del Mond se penaliza por los efectos tóxicos que puede llegar a tener el petróleo crudo.

En ambos índices coinciden las penalizaciones de fugas por junta y cierres, también en el caso de llenado y vaciado donde se pueden introducir riesgos por vibración y fatiga (Ver anexos 20 y 21).

De igual forma también coinciden aspectos en ambas metodologías de los dos índices que no se penalizan como el caso de las reacciones químicas ya que ni en estos tanques ni en ningún otro se produce una reacción química, sino exclusivamente el tratamiento del petróleo. Tampoco incluye penalización el aspecto de altas presiones en ambos índices, debido a que ambas unidades operan a presión atmosférica y esta penalización es para cuando la presión de operación es mayor que 1 atm , todo esto se puede apreciar en los anexos mencionados con anterioridad.

Posteriormente en la metodología del IFE de Dow se calcula el valor del índice IFE para los tanques 701, 702, 703 y 704, este da un valor de 55,73; el cual se encuentra dentro del rango de ligero según se aprecia en la tabla 2.7.

El índice Mond calcula un IFE equivalente, el cual para ambas unidades de proceso tiene un valor de 987,26 y se encuentra dentro del rango de muy catastrófico. Al comparar este valor tanto en número como en clasificación se aprecia que son diferentes y esto se debe a que Mond para el cálculo del IFE equivalente tiene en cuenta el factor material, los riesgos especiales del material (M), los riesgos generales del proceso (P), los riesgos especiales del proceso (S), los riesgos asociados a las cantidades (Q), los riesgos asociados a la distribución de la planta (L) y los riesgos asociados a la toxicidad (T), mientras que el índice Dow no tiene todos estos aspectos en cuenta, solo tiene en cuenta el factor de riesgo del proceso y el factor material.

En la tabla 3.18 se muestran los cálculos de los restantes índices potenciales; así como, sus clasificaciones.

Como se va a observar en la tabla antes mencionada, en todos los Índices existen variaciones en el Grado Total de Riesgo que van desde muy alto hasta muy extremo. El índice potencial de fuego (F) representa un riesgo extremo debido a que este depende de la cantidad de material y este a su vez del volumen del tanque, así como también depende del área de trabajo como del factor material.

Tabla 3.18: Resultados del cálculo de los Índices de Riesgo Potencial.

Índices de Riesgo	Valor	Grado Total de Riesgo
Incendio (F)	855 800,87	Muy Alto
Explosión interna (E)	9,30	Muy Alto
Explosión aérea (A)	72,64	Moderado
Índice unitario de toxicidad (U)	13,95	Muy Alto
Índice máximo incidente tóxico (C)	1 255,50	Muy Alto
Factor Global de Riesgo (R)	2 804 646,53	Muy Extremo

Fuente: Elaboración propia

El índice de Explosión Interna se encuentra en la clasificación de muy alto y el de Explosión Aérea se encuentran en la clasificación de moderado; en el primer caso se debe a que este depende de los riesgos generales del proceso y del material, en el otro caso se debe a que este

depende a los riesgos de cantidad, como estos tanques no son de gran capacidad como los anteriores, es por ello que varía el valor de este índice así como su clasificación.

El valor del Factor Global de Riesgo se clasifica como muy extremo, lo cual es un valor lógico y consecuente debido a que este depende de todos los índices de riesgo analizados anteriormente.

Luego en la metodología del Mond se calculan los factores de bonificación K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5 y K_6 .

En la tabla 3.19 se muestran los resultados del cálculo de los índices corregidos.

Tabla 3.19: Índices corregidos.

Índices	Valor inicial	Valor actual	RPD (%)	Categoría
Incendio (F)	855 800,87	1 088,98	98,7	Ligero
Explosión interna (E)	9,30	1,24	86,6	Bajo
Explosión Aérea (A)	72,64	1,21	98,3	Ligero
Factor Global de Riesgo (R)	15 885,97	28,52	99,8	Bajo

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar los índices F, E, A y R se reducen entre un 87 y 99%, de forma tal que no representan un peligro para la unidad ni amenaza para el personal que allí radica, siempre y cuando se cumplan con todos los protocolos de seguridad establecidos y se utilicen los medios de protección necesarios.

No obstante, el índice máximo de accidente tóxico (C) no se corrige a partir de las bonificaciones que se añaden al incluir los sistemas de seguridad y protección. Por esta razón se debe mantener que, aunque según el índice de riesgo global de Mond (R), la unidad estudiada presenta un nivel de riesgo de operación aceptable, se debe mantener extremo cuidado en mantener todos los sistemas de seguridad funcionando en estado óptimo.

3.2 Conclusiones parciales:

1. Todos los índices calculados sin bonificación en el índice Mond, para todas las unidades de proceso se encuentran en la categoría máxima de riesgo.
2. Los tanques 701, 701, 703 y 704 corresponden a un riesgo bajo en el caso del índice Mond y ligero en el caso del Dow y el resto de los tanques de la planta están dentro del rango de moderado para ambos índices.
3. Para todas las unidades del proceso el IFE equivalente que calcula el índice Mond está dentro de la categoría muy catastrófico.
4. En todas las unidades de proceso los índices F, E, A y R se reducen entre un 87 y 99% de forma tal que no representan un peligro para la unidad ni amenaza para el personal que allí radica.

Conclusiones:

1. Las herramientas más usadas para determinar el riesgo por incendio, explosión y toxicidad en los tanques de almacenamiento y tratamiento de la Planta de Procesamiento de Crudo son los Índices de Incendio y Explosión (IFE) de Dow y de Incendio, Explosión y Toxicidad (MOND) de ICI.
2. En la Planta de Procesamiento de Crudos de EPEP Centro los equipos más propensos a riesgos de incendio y explosión son los tanques de almacenamiento y tratamiento de crudo debido a que en ellos se almacenan la mayor cantidad de combustible de toda la planta en un instante de tiempo.
3. Según el índice Dow todas las unidades de proceso poseen los valores bajos de IFE y se encuentran en un nivel aceptable que oscila entre los rangos de riesgo ligero y moderado.
4. Los riesgos más influyentes sobre los índices calculados corresponden a los especiales del proceso (S) y los asociados a las cantidades (Q).
5. Para todas las unidades del proceso el IFE equivalente que calcula el índice Mond está dentro de la categoría muy catastrófico.
6. En todas las unidades de proceso los índices F, E, A y R se reducen entre un 87 y 99% de forma tal que no representan un peligro para la unidad ni amenaza para el personal que allí radica.

Recomendaciones:

1. Realizar la evaluación de los riesgos por el Índice de Mond y por el Dow para todas las unidades de proceso de la Planta de Procesamiento de Crudo.

Bibliografía:

1. AIChE: American Institute of Chemical Engineers. (1994). *Dow's fire and explosion index hazard classification guide* (7th Ed.). New York: AIChE.
2. Arencibia, E. (2018). *Evaluación de la capacidad de venteo de válvulas de presión y vacío y del índice global de riesgos MOND/ICI en un tanque de tratamiento de petróleo de 10 000 m³*. (Tesis presentada en opción al título de Ingeniera Química). Universidad de Matanzas, Cuba.
3. Blengini, G.A., Blagoeva, D., Dewulf, J., Torres de Matos, C., Nita, V., Vidal-Legaz, ... Ciupagea, C. (2017). *Assessment of the Methodology for Establishing the EUzList of Critical Raw Materials*. Luxemburg: Publications Office of the European Union,
4. Cabrera, J., & De la Torre, F. (2018). *Introducción a la inspección basada en riesgo*. Centro de Estudios en Ingeniería de Mantenimiento (CEIM)- CUJAE. La Habana: RCMan.
5. CAROL, S. (2001). *Una nueva metodología para la predicción de la gravedad de los accidentes industriales*. (Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias). Departamento de Ingeniería Química. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
6. Casal, J., Vílchez, J. A., Rodríguez, S., Planas, E., & Montiel, H. (2002). *Análisis de Riesgo en Instalaciones Industriales*. 2da ed. Barcelona, España: Ediciones UPC.
7. Contreras, R. (2016). *Análisis de riesgos en seguridad y salud ocupacional en una empresa de Consultoría en Ingeniería*. (Trabajo de Titulación para optar por el título profesional de Ingeniero Agrícola). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
8. Crawley, F. (2015). *HAZOP: Guide to Best Practice. Guidelines to Best Practice for the Process and Chemical Industries*. Third Edition. Kidlington, Oxford: Elsevier Ltd.
9. Díaz, A. (2013). *Análisis de riesgos en el área de almacenamiento de gas licuado del petróleo en la Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas*. (Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico). Universidad de Matanzas, Cuba.
10. Domínguez, Y. (2014). *Evaluación de riesgos por efecto continuado en el área de almacenamiento de gas licuado del petróleo en la Empresa Comercializadora de Combustibles Matanzas (ECCM)*. (Tesis presentada en opción al título de Ingeniera Química). Universidad de Matanzas, Cuba.

11. Duclos, P., & Binder, S. (1995). Public health consequences of acute Chemical releases. *Journal of Hazardous Materials*, 23, 109-112.
12. Escuela Nacional de Protección Civil. (2015). México. Disponible en http://www.cenapred.gob.mx/es/documentosWeb/Enaproc/Curso_conato.pdf.
13. Etowa, C.B., Amyotte, P.R., Pegg, M.G., & Khan, F.I. (2002). Quantification of inherent safety aspects of the Dow indices. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 15 (6), 447-487.
14. Fagundo, A. (2012). *Evaluación de riesgos por incendio y explosión en la planta de gas Energas.SA Varadero*. (Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico). Universidad de Matanzas, Cuba.
15. Fibbiani, G., & Moreno, A. (2004). *PSTL (Process Safety Technology Leader) para Europa del Sur y del Medio Este de Dow, EH&S (Environmental, Health & Safety) Delivery Leader para Tarragona (Plastics and Polyurethanes Businesses)*. Disponible en <http://www.interempresas.net>.
16. Garaniya, V., Baalisampang, T., Abbassi, R., Khan, F., & Dadashzadeh, M. (2019) Modelling an integrated impact of fire, explosion and combustion products during transitional events caused by an accidental release of LNG. *Process Safety and Environmental Protection*, 128, 259- 272. doi: 10.1016/lan.2019.06.005
17. García, A. (2014). *Análisis y evaluación preliminar de riesgos de accidentes tecnológicos en la Planta de Procesamiento de Crudo, Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo Centro*. (Trabajo de diploma para optar por el título de Ingeniero Químico). Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba.
18. González, A. (2016). *Evaluación de riesgos de accidentes graves en procesos auxiliares y de producción de aceites básicos en la refinería "Sergio Soto Valdez" de Cabaiguan*. Departamento de ingeniería Química. Santa Clara, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba.
19. GUIAR (Grupo de Investigación Analítica de Riesgos) (2008). Departamento de Química Analítica. Universidad de Zaragoza, España.
20. Gyenes, Z., Wood, M., & Struckl, M. (2017). *Handbook of Scenarios for Assessing Major Chemical Accident Risks*. Luxembourg: European Union.

21. He, Z., & Weng, W. (2019). Synergic effects in the assessment of multi-hazard coupling disasters: Fires, explosions, and toxicant leaks. *Journal of Hazardous Materials*. Disponible en <https://scihub.bban.top/10.1016/j.jhazmat.2019.121813>
22. HSE. (2016). *Prevention of fire and explosion, and emergency response on*
23. HSE. (2018). *Annual Science Review. Helping Great Britain work we*. Disponible en: <http://www.hse.gov.uk/horizons/>.
24. Ibarra, E. V., Goya, F. A., Guerra, B. F., Dupin, M., & Pérez, L. (2015). Técnicas utilizadas para la identificación y valoración de los peligros en las distintas etapas de la vida de los procesos químicos industriales. *Centro Azúcar*, 41(4), 30-40.
25. Kidam, K., & Hurme, M. (2013). Analysis of equipment failures as contributors to chemical process accidents. *Process Safety and Environmental Protection*, 91, 61-78.
26. Lianling, R., Changbo, L.U., Gaojun, A.N., Chunhua, X., Bai, C., Youjie, Z., & Xudong, W. (2014). Progress on Fire and Explosion Suppression Technologies for Light Petroleum Fuel. *Procedia Engineering*, 84, 384 -393.
27. Lugo, G. (2015). *Riesgo químico. Sus implicaciones en los incendios y explosiones*. Escuela Nacional de Bomberos. La Habana: Editorial Universitaria.
28. Luis, J.D. (2010). *Análisis de riesgos industriales*. Curso correspondiente a la maestría de ingeniería química. Departamento de Química e Ingeniería Química. Universidad de Matanzas, Cuba.
29. Marhavalas, P. K., Koulouriotis, D. E., & Gemeni, V. (2011). Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000-2009. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24, 477-523.
30. Medina, N., Jiménez, A., & Grossmann, I. E. (2014). A mathematical programming model for optimal layout considering quantitative risk analysis. *Computers and Chemical Engineering*, 68, 165-181.
31. Montes de Oca, W.J. (2013). *Elevada emisión de gases y vapores en las islas de carga de combustibles, del terminal pascales de la EP Petroecuador; riesgos de incendio, explosión y su incidencia en la salud de los trabajadores; diseño de un plan de acción para la aplicación de las medidas de control correspondientes*. (Tesis de grado previo a la obtención del título de magister en seguridad, higiene industrial y salud ocupacional). Universidad de Guayaquil, Ecuador.

32. Necci, A. (2015). *Cascading events triggering industrial accidents: Quantitative Assessment of NaTech and Domino Scenarios*. (Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas). Universidad de Bologna, Italia.
33. Nolan, Dennis P. (2018). *Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical and Related Facilities*. Second edition. Kidlington, Inglaterra: Gulf Professional Publishing. *Offshore installations*. Disponible en: <https://www.hse.gov.uk/pUbns/priced/l65.pdf>
34. Paltrinieri, N., & Khan, F. (2016). *Dynamic Risk Analysis In The Chemical And Petroleum Industry*. Kidlington, Oxford: United Kingdom.
35. Parrales, J.M. (2011). *Prevención de incendios en tanques de almacenamiento de petróleo crudo*. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
36. Piedra, J.P., & Valdivieso, J.C. (2013). *Evaluación del riesgo de incendio y explosión en una línea de extrusión de polietileno expandido*. (Tesis previa a la obtención del grado de Magister en Sistemas Integrados de Gestión de la Calidad, Ambiente y Seguridad). Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
37. Plascencia, E. (1995). *Índice de Incendio, Explosión y Toxicidad (MOND –ICI)*. Curso sobre Métodos de Evaluación de Riesgos de Incendio del Instituto Tecnológico de Seguridad MAPFRE (ITSEMAP)
38. Poujaud, D. (2017). *Estimación de riesgos por incendio y explosión en la sección de hidrofinación de diésel de una refinería de petróleo*. (Tesis presentada en opción al título de Ingeniera Química). Universidad de Matanzas, Cuba.
39. Pulido, J.L. (2005). *Prevención y control de incendios y explosiones en la producción y almacenamiento de Gas Licuado de Petróleo (GLP)*. (Tesis para optar el título profesional de ingeniero de higiene y seguridad industrial). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
40. Rosero, J. (2015). *Identificación y Evaluación de riesgo de incendio y explosión en el área de almacenamiento de productos limpios, tanque 1020, Simulación de efectos en caso de emergencia*. (Trabajo en opción del título de Ingeniero en Seguridad y Salud Ocupacional). Universidad Internacional SEK, Quito, Ecuador.
41. Sánchez, M. (2016). *Curso de análisis de riesgos industriales en plantas químicas y petroleras. Método HAZOP (XVI Edición)*. Disponible en: <https://mafiadoc.com/curso-analisis-de-riesgos-industriales-en-plantas-quimicas-y-59dcaf271723dddeebf2a689.html>

- 42.Sano, K., Koshiba, Y., & Ohtani, H. (2019). Risk assessment and risk reduction of an acrylonitrile production plant. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 63. In press.
- 43.Toledo, A. (2016). *Evaluación de riesgos por incendio y explosión en la etapa de destilación atmosférica de la refinería de petróleo "Camilo Cienfuegos"*. (Tesis presentada en opción al título de Ingeniera Química). Universidad de Matanzas, Cuba.
- 44.Zhang, C. (2018). Analysis of Fire Safety System for Storage Enterprises of Dangerous Chemicals. *Procedia Engineering*, 211, 986- 995.

Anexos:

Anexo 1: Principales industrias en las que se pueden producir accidentes como: escapes tóxicos, explosiones e incendios.

Principales Industrias Químicas de Procesos:
1. Plantas donde se fabrican o manipulan sustancias químicas, entre las que destacan: Amoníaco; Cloro; Hidrógeno; Benceno; Propano; Butano; Propileno; Etileno; Estireno; Cloruro de vinilo; Ácido Sulfúrico; PVC; Ácido Acético; Otros.
2. Refinerías de petróleo: Gas Licuado de Petróleo (GLP) y derivados (gasolina, fuel oíl, queroseno).
3. Refinerías de gas natural.
4. Almacenamiento de sustancias químicas.
5. Industria farmacéutica.

Fuente: Ibarra *et al*, (2015)

Anexo 2: Ejemplos de accidentes en la industria del petróleo a nivel mundial.

Accidentes	Causas	Observaciones
Explosión en una Refinería española de REPSOL-YPF en Puertollano	El accidente ocurrió en la Unidad 100 del área de Refinería y Conversión por la presencia de una posible bolsa de gas en una torre de destilación de crudo o en el techo flotante de uno de los tanques de gasolina en contacto con alguna fuente de calor o eléctrica. El estallido de ese gas hizo que se incendiaron uno tras otro los siete tanques de gasolina que componían el cubeto.	9 muertos y varios heridos por quemaduras
Accidente en una refinería de México (PEMEX)	Una grúa que maniobraba en las instalaciones de Pemex se enganchó un cable de alta tensión fuera de servicio cerca del taller de tuberías y derribó un poste, el cual cayó sobre tres trabajadores.	Fallecieron 3 personas (ayudantes de operarios)
Accidente en el Centro de Refinación Paraguaná.	Incendio en la refinería Amuay, estado Falcón, por causas no determinadas. Los equipos principales de la unidad no sufrieron ningún daño, ni el reactor, compresor u horno, el incendio está concentrado en la torre absorbedora y no se saben cuáles fueron las causas.	No hubo muertos ni heridos, ni se paralizaron las actividades.
Incendio de la planta de CLH en Valladolid.	Ardió un tanque, el número 38, que contenía dos millones de litros de gasolina de 98 octanos. El fuego, comenzó cuando los operarios limpiaban el recipiente.	Dos heridos, uno grave
Incendio y explosión en una planta petroquímica en Sulphur, USA.	Incendio y explosión en la petroquímica Westlake de la localidad de Sulphur, al romperse una tubería con etileno y provocar un incendio	Resultó herido un empleado
Incendio de un camión cargado con gasolina en Chicago.	Incendio de un camión cisterna cargado con gasolina que sufrió un accidente y se incendió posteriormente.	Hubo un muerto
Incendio en la refinería de petróleo de Chevron en Richmond, EE.UU	Se desencadenó el fuego a partir de una tubería dañada y una columna de humo negro y tóxico se elevó unos 915 metros en el aire y se expandió a lo largo de la zona este de la bahía de San Francisco. Se clasificó como “cercano a un	Un empleado herido. Días después, 15.000 residentes se presentaron en centros médicos con problemas respiratorios, ansiedad e irritaciones en la garganta y en los ojos

	desastre” que pudo haber matado a docenas de trabajadores.	
Explosiones en una planta de almacenamiento de combustible en Bayamón. Puerto Rico	El 23 de octubre de 2009 se produjo una serie de explosiones e incendios dentro de las instalaciones de la compañía Caribbean Petroleum Corporation, causados por una falla en los sensores de nivel de llenado en uno de los tanques de almacenamiento de combustible.	Dstrucción de más de la mitad de los tanques de almacenamiento de combustible activos en la planta, daños importantes al ambiente y a los habitantes de la zona de desastre, pérdida económica de gran magnitud.

Fuente: Fagundo (2012)

Anexo 3: Principales técnicas para identificar y evaluar peligros.

Técnica	Identifica peligros de:	Evaluación peligros
HAZard and OPerability analysis (HAZOP), Análisis de peligros y operabilidad	Procesos	Cualitativa
What if, Qué pasaría si?	Procesos	Cualitativa
Concept Hazard Analysis (CHA),	Procesos	Cualitativa
Concept Safety Review (CSR)	Procesos	Cualitativa
Preliminary Hazard Analysis (PrHA),	Procesos	Cualitativa
Análisis preliminar del peligro, (HAZID)	Procesos	Cualitativa
Pre-HAZOP	Procesos	Cualitativa
Standard/Codes of practice/ Literature Review	Procesos	Cualitativa
Procesos Functional Integrated Hazard Identification (FIHI)	Procesos	Cualitativa
Checklist, Lista de revisión o chequeo	Procesos	Cualitativa
What-if/checklist	Procesos	Cualitativa
Matrices	Procesos	Cualitativa
Inherent Hazard Analysis,	Procesos	Cualitativa
Critical Examination of System Safety (CEX)	Procesos	
Method Organized Systematic Analysis of	Procesos	Semi-cualitativa

Risk (MOSAR)		
Goal Oriented Failure Analysis (GOFA)	Procesos	Semi-cualitativa
Preliminary Consequence Analysis (PCA)	Procesos	Cuantitativa
Relative Ranking, Clasificación relativa de peligros	Procesos	Cuantitativa
Failure Mode and Effect Analysis (FMEA), Análisis de modos de fallo y sus efectos	Equipo	Cualitativa
Fault Tree Analysis (FTA), Análisis de árboles de fallo	Equipo	Cualitativa/cuantitativa
Event Tree Analysis (ETA), Análisis de árboles de sucesos	Equipo	Cualitativa/cuantitativa
Cause-Consequence Analysis (CCA), Análisis de causa-consecuencia	Equipo	Cualitativa/cuantitativa
Safety review, Revisión de seguridad	Equipo	Cualitativa
Functional FMEA, Análisis funcional de modos de fallo y sus efectos	Equipo	Cualitativa
Failure Modes, Effects and Critically Analysis (FMECA), Modos de fallo, efectos y análisis crítico	Equipo	Cualitativa
Maintenance and Operability study (MOp), Estudios de mantenimiento y operabilidad	Equipo	Cualitativa
Maintenance Analysis, Análisis de mantenimiento	Equipo	Cualitativa/cuantitativa
Sneack Analysis, Reliability	Equipo	Cualitativa
Block Diagram	Equipo	Cuantitativa
Structural Reliability Analysis	Equipo	Cuantitativa
DEFI method, Método DEFI	Equipo	Cuantitativa

Pattern Search method	Factor humano	Cualitativa
Human Reliability Analysis (HRA), Análisis de fiabilidad humana	Factor humano	Semi-cualitativa
Predictive Human Error Analysis (PHEA), Análisis predictivo del error humano	Factor humano	Semi-cualitativa
Task analysis, Análisis de tareas	Factor humano	Cualitativa/cuantitativa
Action Error Analysis (AEA)	Factor humano	Cualitativa/cuantitativa
Tormenta de Ideas		Cualitativa
Entrevistas Estructuradas o Semiestructuradas		Cualitativa
Delphi		Cualitativa
Análisis de riesgos y puntos críticos de control (HACCP)		Cualitativa
Evaluación de Riesgos ambientales		Cualitativa
Análisis de escenarios		Cualitativa
Análisis de causa raíz		Cualitativa
Análisis de causa y efecto		Cualitativa
Análisis de protección de capa (LOPA)		Cuantitativo
Análisis Bow tie		Cuantitativo

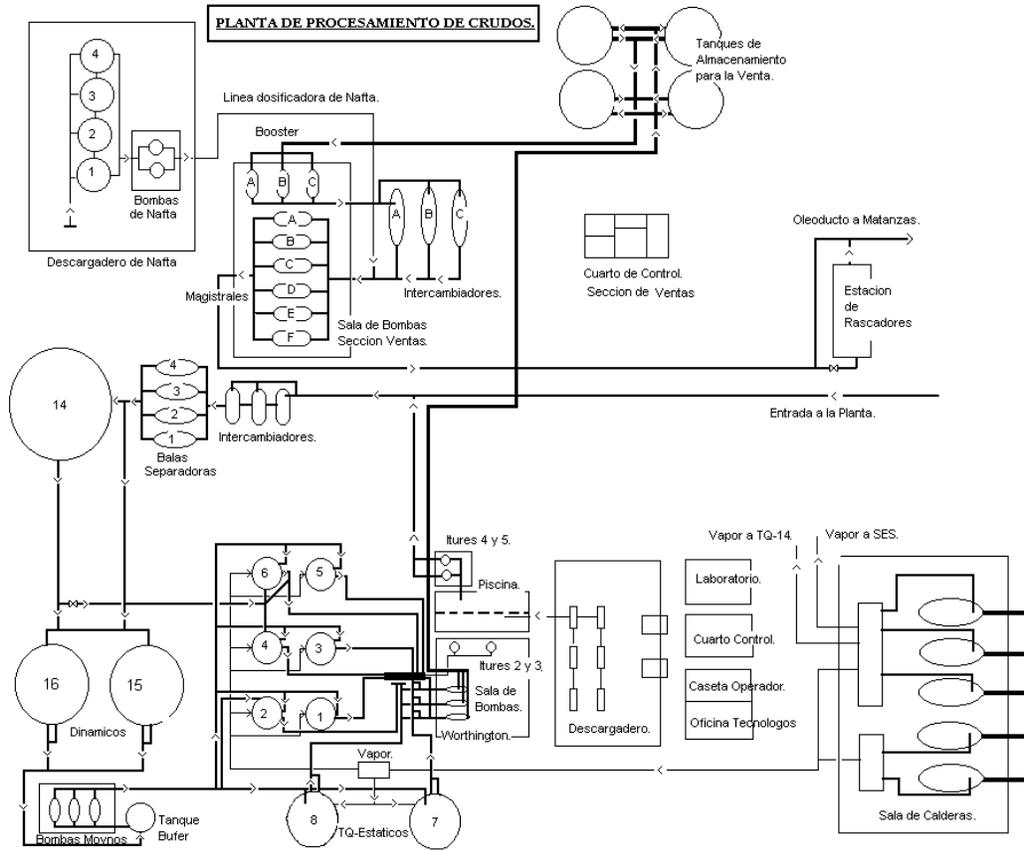
Fuente: Ibarra *et al*, (2015)

Anexo 4: Clasificación de los índices de riesgo según su grado de descripción.

Basados en la definición de riesgo. (Grado de descripción bajo).	Basados en la carga de fuego. (Grado de descripción medio).	Basados en la peligrosidad de las sustancias. (Grado de descripción alto).
Fine	MESERI	IFAL
SEPTRI	Gretnener	IFE (de Dow)
HRN	Eric	Mond (de ICI)
	Purt	CEI (de Dow)
	Coeficientes K	UCSIP
	Coeficientes α	

Fuente: Luis (2010).

Anexo 5: Diagrama de la Planta de Procesamiento de Crudo.



Anexo 6: Unidades de proceso seleccionadas para el análisis de riesgo mediante el IFE de Dow y el índice Mond de ICI.

Unidades	Sustancias que se manejan
1. Compuesta por el tanque 6	- Petróleo Crudo - Sulfuro de hidrógeno
2. Compuesta por el tanque 7	- Petróleo Crudo
3. Compuesta por el tanque 8	- Petróleo Crudo
4. Compuesta por el tanque 14	- Petróleo Crudo
5. Compuesta por el tanque 15	- Petróleo Crudo
6. Compuesta por el tanque 16	- Petróleo Crudo
7. Compuesta por el tanque 101	- Petróleo Crudo
8. Compuesta por el tanque 102	- Petróleo Crudo
9. Compuesta por el tanque 103	- Petróleo Crudo
10. Compuesta por el tanque 104	- Petróleo Crudo
11. Compuesta por el tanque 701	- Nafta
12. Compuesta por el tanque 702	- Nafta
13. Compuesta por el tanque 703	- Nafta
14. Compuesta por el tanque 704	- Nafta

Fuente: Elaboración propia

Anexo 7: Factor material y otras propiedades tomadas de AIChE (1994).

COMPOUND	MF	Hc BTU/LB X 10 ³	NFPA Classification			Flash Point (deg F)	Boiling Point (deg F)
			N(H)	N(F)	N(R)		
Acetaldehyde	24	10.5	3	4	2	-36	69
Acetic Acid	14	5.6	3	2	1	103	244
Acetic Anhydride	14	7.1	3	2	1	126	282
Acetone	16	12.3	1	3	0	-4	133
Acetone Cyanohydrin	24	11.2	4	2	2	165	203
Acetonitrile	16	12.6	3	3	0	42	179
Acetyl Chloride	24	2.5	3	3	2	40	124
Acetylene	29	20.7	0	4	3	Gas	-118
Acetyl Ethanolamine	14	9.4	1	1	1	355	304 - 308
Acetyl Peroxide	40	6.4	1	2	4	-	(4)
Acetyl Salicylic Acid [8]	16	8.9	1	1	0	-	-
Acetyl Tributyl Citrate	4	10.9	0	1	0	400	343(1)
Acrolein	29	11.8	4	3	3	-15	127
Acrylamide	24	9.5	3	2	2	-	257(1)
Acrylic Acid	24	7.6	3	2	2	124	286
Acrylonitrile	24	13.7	4	3	2	32	171
Allyl Alcohol	16	13.7	4	3	1	72	207
Allylamine	16	15.4	4	3	1	-4	128
Allyl Bromide	16	5.9	3	3	1	28	160
Allyl Chloride	16	9.7	3	3	1	-20	113
Allyl Ether	24	16.0	3	3	2	20	203
Aluminum Chloride	24	(2)	3	0	2	-	(3)
Ammonia	4	8.0	3	1	0	Gas	-28
Ammonium Nitrate	29	12.4(7)	0	0	3	-	410
Amyl Acetate	16	14.6	1	3	0	60	300
Amyl Nitrate	10	11.5	2	2	0	118	306 - 315
Aniline	10	15.0	3	2	0	158	364
Barium Chlorate	14	(2)	2	0	1	-	-

COMPOUND	MF	Hc BTU/LB X 10 ³	NFPA Classification			Flash Point (deg F)	Boiling Point (deg F)
			N(H)	N(F)	N(R)		
Barium Stearate	4	8.9	0	1	0	-	-
Benzaldehyde	10	13.7	2	2	0	148	354
Benzene	16	17.3	2	3	0	12	176
Benzoic Acid	14	11.0	2	1	1	250	482
Benzyl Acetate	4	12.3	1	1	0	195	417
Benzyl Alcohol	4	13.8	2	1	0	200	403
Benzyl Chloride	14	12.6	2	2	1	162	387
Benzyl Peroxide	40	12.0	1	3	4	-	-
Bisphenol A	14	14.1	2	1	1	175	428
Bromine	1	0.0	3	0	0	-	138
Bromobenzene	10	8.1	2	2	0	124	313
o-Bromotoluene	10	8.5	2	2	0	174	359
1,3-Butadiene	24	19.2	2	4	2	-105	24
Butane	21	19.7	1	4	0	-76	31
1-Butanol (Butyl alcohol)	16	14.3	1	3	0	84	243
1-Butene	21	19.5	1	4	0	Gas	21
Butyl Acetate	16	12.2	1	3	0	72	260
Butyl Acrylate	24	14.2	2	2	2	103	300
n-Butylamine	16	16.3	3	3	0	10	171
Butyl Bromide	16	7.6	2	3	0	65	215
Butyl Chloride	16	11.4	2	3	0	15	170
2,3-Butylene Oxide	24	14.3	2	3	2	5	149
Butyl Ether	16	16.3	2	3	1	92	288
t-Butyl Hydroperoxide	40	11.9	1	4	4	< 80 or above	(9)
Butyl Nitrate	29	11.1	1	3	3	97	277
t-Butyl Peracetate	40	10.6	2	3	4	< 80	(4)
t-Butyl Perbenzoate	40	12.2	1	3	4	> 190	(4)
t-Butyl Peroxide	29	14.5	1	3	3	64	176

COMPOUND	MF	Hc BTU/LB X 10 ³	NFPA Classification			Flash Point (deg F)	Boiling Point (deg F)
			N(H)	N(F)	N(R)		
Calcium Carbide	24	9.1	3	3	2	-	-
Calcium Stearate [6]	4	-	0	1	0	-	-
Carbon Disulfide	21	6.1	3	4	0	-22	115
Carbon Monoxide	21	4.3	3	4	0	Gas	-313
Chlorine	1	0.0	4	0	0	Gas	-29
Chlorine Dioxide	40	0.7	3	1	4	Gas	50
Chloroacetyl Chloride	14	2.5	3	0	1	-	223
Chlorobenzene	16	10.9	2	3	0	84	270
Chloroform	1	1.5	2	0	0	-	143
Chloro Methyl Ethyl Ether	14	5.7	2	1	1	-	-
1-Chloro 1-Nitroethane	29	3.5	3	2	3	133	344
o-Chlorophenol	10	9.2	3	2	0	147	47
Chloropicrin	29	5.8(7)	4	0	3	-	234
2-Chloropropane	21	10.1	2	4	0	-26	95
Chlorostyrene	24	12.5	2	1	2	165	372
Coumarin	24	12.0	2	1	2	-	554
Cumene	16	18.0	2	3	1	96	306
Cumene Hydroperoxide	40	13.7	1	2	4	175	(4)
Cyanamide	29	7.0	4	1	3	286	500
Cyclobutane	21	19.1	1	4	0	Gas	55
Cyclohexane	16	18.7	1	3	0	-4	179
Cyclohexanol	10	15.0	1	2	0	154	322
Cyclopropane	21	21.3	1	4	0	Gas	-29
DER* 331	14	13.7	1	1	1	485	878
Dichlorobenzene	10	8.1	2	2	0	151	357
1,2-Dichloroethylene	24	6.9	2	3	2	36 - 39	140
1,3-Dichloropropene	16	6.0	3	3	0	95	219
2,3-Dichloropropene	16	5.9	2	3	0	59	201

COMPOUND	MF	Hc BTU/LB X 10 ³	NFPA Classification			Flash Point (deg F)	Boiling Point (deg F)
			N(H)	N(F)	N(R)		
3,5-Dichloro Salicylic Acid	24	5.3	0	1	2	-	-
Dichlorostyrene	24	9.3	2	1	2	225	-
Dicumyl Peroxide	29	15.4	0	1	3	-	-
Dicyclopentadiene	16	17.9	1	3	1	90	342
Diesel Fuel	10	18.7	0	2	0	100 - 130	315
Diethanolamine	4	10.0	1	1	0	342	514
Diethylamine	16	16.5	3	3	0	-18	132
m-Diethyl Benzene	10	18.0	2	2	0	133	358
Diethyl Carbonate	16	9.1	2	3	1	77	259
Diethylene Glycol	4	8.7	1	1	0	255	472
Diethyl Ether	21	14.5	2	4	1	-49	94
Diethyl Peroxide	40	12.2	-	4	4	(4)	(4)
Diisobutylene	16	19.0	1	3	0	23	214
Diisopropyl Benzene	10	17.9	0	2	0	170	401
Dimethylamine	21	15.2	3	4	0	Gas	44
2,2-Dimethyl-1-Propanol	16	14.8	2	3	0	98	237
1,2-Dinitrobenzene	40	7.2	3	1	4	302	606
2,4-Dinitro Phenol	40	6.1	3	1	4	-	-
1,4-Dioxane	16	10.5	2	3	1	54	214
Dioxolane	24	9.1	2	3	2	35	165
Diphenyl Oxide	4	14.9	1	1	0	239	496
Dipropylene Glycol	4	10.8	0	1	0	250	449
Di-tert-butyl Peroxide	40	14.5	3	2	4	65	231
Divinyl Acetylene	29	18.2	-	3	3	< -4	183
Divinylbenzene	24	17.4	2	2	2	157	392
Divinyl Ether	24	14.5	2	3	2	< -22	102
DOWANOL* DM	10	10.0	2	2	0	197 (Seto)	381
DOWANOL* EB	10	12.9	1	2	0	150	340

COMPOUND	MF	Hc BTU/LB X 10 ³	NFPA Classification			Flash Point (deg F)	Boiling Point (deg F)
			N(H)	N(F)	N(R)		
DOWANOL* PM	16	11.1	0	3	0	90 (Seta)	248
DOWANOL* PnB	10	-	0	2	0	138	338
DOWICIL* 75	24	7.0	2	2	2	-	-
DOWICIL* 200	24	9.3	2	2	2	-	-
DOWFROST*	4	9.1	0	1	0	215 (TOC)	370
DOWFROST* HD	1	-	0	0	0	None	240
DOWFROTH* 250	1	-	0	0	0	300 (Seta)	473
DOWTHERM* 4000	4	7.0	1	1	0	252 (Seta)	330
DOWTHERM* A	4	15.5	2	1	0	232	495
DOWTHERM* G	4	15.5	1	1	0	266 (Seta)	551
DOWTHERM* HT	4	-	1	1	0	322 (TOC)	650
DOWTHERM* J	10	17.8	1	2	0	136 (Seta)	358
DOWTHERM* LF	4	16.0	1	1	0	240	550 - 558
DOWTHERM* Q	4	17.3	1	1	0	249 (Seta)	513
DOWTHERM* SR-1	4	7.0	1	1	0	232	325
DURSBAN*	14	19.8	1	2	1	81 - 110	-
Epichlorohydrin	24	7.2	3	3	2	88	241
Ethane	21	20.4	1	4	0	Gas	-128
Ethanolamine	10	9.5	2	2	0	185	339
Ethyl Acetate	16	10.1	1	3	0	24	171
Ethyl Acrylate	24	11.0	2	3	2	48	211
Ethyl Alcohol	16	11.5	0	3	0	55	173
Ethylamine	21	16.3	3	4	0	< 0	62
Ethyl Benzene	16	17.6	2	3	0	70	277
Ethyl Benzoate	4	12.2	1	1	0	190	414
Ethyl Bromide	4	5.6	2	1	0	None	100
Ethylbutylamine	16	17.0	3	3	0	64	232
Ethyl Butylcarbonate	14	10.6	2	2	1	122	275

COMPOUND	MF	Hc BTU/LB X 10 ³	NFPA Classification			Flash Point (deg F)	Boiling Point (deg F)
			N(H)	N(F)	N(R)		
Ethyl Butyrate	16	12.2	0	3	0	75	248
Ethyl Chloride	21	8.2	1	4	0	-58	54
Ethyl Chloroformate	16	5.2	3	3	1	61	203
Ethylene	24	20.8	1	4	2	Gas	-155
Ethylene Carbonate	14	5.3	2	1	1	290	351
Ethylenediamine	10	12.4	3	2	0	110	239
Ethylene Dichloride	16	4.6	2	3	0	56	181 - 183
Ethylene Glycol	4	7.3	1	1	0	232	387
Ethylene Glycol Dimethyl Ether	10	11.6	2	2	0	29	174
Ethylene Glycol Monoacetate	4	8.0	0	1	0	215	347
Ethylenimine	29	13.0	4	3	3	12	135
Ethylene Oxide	29	11.7	3	4	3	-4	51
Ethyl Ether	21	14.4	2	4	1	-49	94
Ethyl Formate	16	8.7	2	3	0	-4	130
2-Ethylhexanal	14	16.2	2	2	1	112	325
1,1-Ethylidene Dichloride	16	4.5	2	3	0	2	135 - 138
Ethyl Mercaptan	21	12.7	2	4	0	<0	95
Ethyl Nitrate	40	6.4	2	3	4	50	190
Ethyl Propyl Ether	16	15.2	1	3	0	< -4	147
p-Ethyl Toluene	10	17.7	3	2	0	887	324
Fluorine	40	-	4	0	4	Gas	-307
Fluorobenzene	16	13.4	3	3	0	5	185
Formaldehyde (Anhydrous Gas)	21	8.0	3	4	0	Gas	-6
Formaldehyde, solutions (37 - 56%)	10	-	3	2	0	140 - 181	206 - 212
Formic Acid	10	3.0	3	2	0	122	213
Fuel Oil #1	10	18.7	0	2	0	100 - 162	304 - 574
Fuel Oil #2	10	18.7	0	2	0	126 - 204	-
Fuel Oil #4	10	18.7	0	2	0	142 - 240	-

COMPOUND	MF	Hc BTU/LB X 10 ³	NFPA Classification			Flash Point (deg F)	Boiling Point (deg F)
			N(H)	N(F)	N(R)		
Fuel Oil #6	10	18.7	0	2	0	150 - 270	-
Furan	21	12.6	1	4	1	< 32	88
Gasoline	16	18.8	1	3	0	-45	100 - 400
Glycerine	4	6.9	1	1	0	390	340
Glycolonitrile	14	7.6	1	1	1	-	-
Heptane	16	19.2	1	3	0	25	209
Hexachlorobutadiene	14	2.0	2	1	1	-	-
Hexachloro Diphenyl Oxide	14	5.5	2	1	1	-	-
Hexanal	16	15.5	2	3	1	90	268
Hexane	16	19.2	1	3	0	-7	156
Hydrazine (anhydrous)	29	7.7	3	3	3	100	236
Hydrogen	21	51.6	0	4	0	Gas	-423
Hydrogen Cyanide	24	10.3	4	4	2	0	79
Hydrogen Peroxide (40 to 60%)	14	(2)	2	0	1	-	226 - 237
Hydrogen Sulfide	21	6.5	4	4	0	Gas	-76
Hydroxylamine	29	3.2	2	0	3	(4)	158
2-Hydroxyethyl Acrylate	24	8.9	2	1	2	214	410
Hydroxypropyl Acrylate	24	10.4	3	1	2	207	410
Isobutane	21	19.4	1	4	0	Gas	11
Isobutyl Alcohol	16	14.2	1	3	0	82	225
Isobutylamine	16	16.2	2	3	0	15	150
Isobutylchloride	16	11.4	2	3	0	< 70	156
Isopentane	21	21.0	1	4	0	< -60	82
Isoprene	24	18.9	2	4	2	-65	93
Isopropanol	16	13.1	1	3	0	53	181
Isopropenyl Acetylene	24	-	2	4	2	< 19	92
Isopropyl Acetate	16	11.2	1	3	0	34	194
Isopropylamine	21	15.5	3	4	0	-15	93

COMPOUND	MF	Hc BTU/LB X 10 ³	NFPA Classification			Flash Point (deg F)	Boiling Point (deg F)
			N(H)	N(F)	N(R)		
Isopropyl Chloride	21	10.0	2	4	0	-26	95
Isopropyl Ether	16	15.6	2	3	1	-18	156
Jet Fuel A & A-1	10	21.7	0	2	0	110 - 150	400 - 550
Jet Fuel B	16	21.7	1	3	0	-10 to +30	-
Kerosene	10	18.7	0	2	0	100 - 162	304 - 574
Lauryl Bromide	4	12.9	1	1	0	291	356
Lauryl Mercaptan	4	16.8	2	1	0	262	289
Lauryl Peroxide	40	15.0	0	1	4	-	-
LORSBAN* 4E	14	3.0	1	2	1	85	165
Lube Oil (mineral)	4	19.0	0	1	0	300 - 450	680
Magnesium	14	10.6	0	1	1	-	2025
Maleic Anhydride	14	5.9	3	1	1	215	395
Methacrylic Acid	24	9.3	3	2	2	171	325
Methane	21	21.5	1	4	0	Gas	-258
Methyl Acetate	16	8.5	1	3	0	14	140
Methylacetylene	24	20.0	2	4	2	Gas	-10
Methyl Acrylate	24	18.7	3	3	2	27	177
Methyl Alcohol	16	8.6	1	3	0	52	147
Methylamine	21	13.2	3	4	0	Gas	21
Methyl Amyl Ketone	10	15.4	1	2	0	102	302
Methyl Borate	16	-	2	3	1	< 80	156
Methyl Carbonate	16	6.2	2	3	1	66	192
Methylcellulose (bag storage)	4	6.5	0	1	0	-	-
Methylcellulose Dust [8]	16	6.5	0	1	0	-	-
Methyl Chloride	21	5.5	1	4	0	-50	-12
Methyl Chloroacetate	14	5.1	2	2	1	135	266
Methylcyclohexane	16	19.0	2	3	0	25	214
Methyl Cyclopentadiene	14	17.4	1	2	1	120	163

COMPOUND	MF	Hc BTU/LB X 10 ³	NFPA Classification			Flash Point (deg F)	Boiling Point (deg F)
			N(H)	N(F)	N(R)		
Methylene Chloride	4	2.3	2	1	0	-	104
Methylene Diphenyl Diisocyanate	14	12.6	2	1	1	460	(9)
Methyl Ether	21	12.4	2	4	1	Gas	-11
Methyl Ethyl Ketone	16	13.5	1	3	0	16	176
Methyl Formate	21	6.4	2	4	0	-2	89
Methyl Hydrazine	24	10.9	4	3	2	21	190
Methyl Isobutyl Ketone	16	16.6	2	3	1	64	242
Methyl Mercaptan	21	10.0	4	4	0	Gas	43
Methyl Methacrylate	24	11.9	2	3	2	50	213
2-Methylpropanal	24	15.4	3	3	2	35	154
Methyl Vinyl Ketone	24	13.4	4	3	2	20	179
Mineral Oil	4	17.0	0	1	0	380	680
Mineral Seal Oil	10	17.6	0	2	0	275	480 - 680
Monochlorobenzene	16	11.3	2	3	0	84	270
Monoethanolamine	10	9.6	2	2	0	185	339
Naphtha, V.M. & P, Regular	16	18.0	1	3	0	28	212 - 320
Naphthalene	10	16.7	2	2	0	174	424
Nitrobenzene	14	10.4	3	2	1	190	411
Nitrobiphenyl	4	12.7	2	1	0	290	626
Nitrochlorobenzene	4	7.8	3	1	0	261	457 - 475
Nitroethane	29	7.7	1	3	3	82	237
Nitroglycerine	40	7.8	2	2	4	(4)	(4)
Nitromethane	40	5.0	1	3	4	95	213
Nitropropanes	24	9.7	1	3	2	75 - 93	249 - 269
p-Nitrotoluene	14	11.2	3	1	1	223	460
N-SERV*	14	15.0	2	2	1	102	300
Octane	16	20.5	0	3	0	56	258
t-Octyl Mercaptan	10	16.5	2	2	0	115	318 - 329

COMPOUND	MF	Hc BTU/LB X 10 ³	NFPA Classification			Flash Point (deg F)	Boiling Point (deg F)
			N(H)	N(F)	N(R)		
Oleic Acid	4	16.8	0	1	0	372	547
Pentamethylene Oxide	16	13.7	2	3	1	-4	178
Pentane	21	19.4	1	4	0	< -40	97
Peracetic Acid	40	4.8	3	2	4	105	221
Perchloric Acid	29	(2)	3	0	3	-	66 (9)
Petroleum - Crude	16	21.3	1	3	0	20 - 90	-
Phenol	10	13.4	4	2	0	175	358
2-Picoline	10	15.0	2	2	0	102	262
Polyethylene	10	18.7	-	-	-	NA	NA
Polystyrene Foam	16	17.1	-	-	-	NA	NA
Polystyrene Pellets	10	-	-	-	-	NA	NA
Potassium (metal)	24	-	3	3	2	-	1410
Potassium Chlorate	14	(2)	1	0	1	-	752
Potassium Nitrate	29	(2)	1	0	3	-	762
Potassium Perchlorate	14	-	1	0	1	-	-
Potassium Peroxide	14	-	3	0	1	-	(9)
Propanal	16	12.5	2	3	1	-22	120
Propane	21	19.9	1	4	0	Gas	-44
1,3-Propanediamine	16	13.6	2	3	0	75	276
Propargyl Alcohol	29	12.6	4	3	3	97	237 - 239
Propargyl Bromide	40	13.6 (7)	4	3	4	50	192
Propionic Nitrile	16	15.0	4	3	1	36	207
Propyl Acetate	16	11.2	1	3	0	55	215
Propyl Alcohol	16	12.4	1	3	0	74	207
Propylamine	16	15.8	3	3	0	-35	120
Propylbenzene	16	17.3	2	3	0	86	310
Propylchloride	16	10.0	2	3	0	< 0	115
Propylene	21	19.7	1	4	1	-162	-54

COMPOUND	MF	Hc BTU/LB X 10 ³	NFPA Classification			Flash Point (deg F)	Boiling Point (deg F)
			N(H)	N(F)	N(R)		
Propylene Dichloride	16	6.3	2	3	0	60	205
Propylene Glycol	4	9.3	0	1	0	210	370
Propylene Oxide	24	13.2	3	4	2	-35	94
n-Propyl Ether	16	15.7	1	3	0	70	194
n-Propyl Nitrate	29	7.4	2	3	3	68	230
Pyridine	16	5.9	2	3	0	68	240
Sodium	24	-	3	3	2	-	1619
Sodium Chlorate	24	-	1	0	2	-	(4)
Sodium Dichromate	14	-	1	0	1	-	(4)
Sodium Hydride	24	-	3	3	2	-	(4)
Sodium Hydrosulfite	24	-	2	1	2	-	(4)
Sodium Perchlorate	14	-	2	0	1	-	(4)
Sodium Peroxide	14	-	3	0	1	-	(4)
Stearic Acid	4	15.9	1	1	0	385	726
Styrene	24	17.4	2	3	2	88	293
Sulfur Chloride	14	1.8	3	1	1 (5)	245	280
Sulfur Dioxide	1	0.0	3	0	0	Gas	14
SYLTHERM [®] 800	4	12.3	1	1	0	> 320 (10)	398
SYLTHERM [®] XLT	10	14.1	1	2	0	108	345
TELONE [®] II	16	3.2	2	3	0	83	220
TELONE [®] C-17	16	2.7	3	3	1	79	200
Toluene	16	17.4	2	3	0	40	232
Toluene 2,4-Diisocyanate	24	10.6	3	1	2	270	484
Tributylamine	10	17.8	3	2	0	145	417
1,2,4-Trichlorobenzene	4	6.2	2	1	0	222	415
1,1,1-Trichloroethane	4	3.1	2	1	0	None	165
Trichloroethylene	10	2.7	2	1	0	None	189
1,2,3-Trichloropropane	10	4.3	3	2	0	160	313

COMPOUND	MF	Hc BTU/LB X 10 ³	NFPA Classification			Flash Point (deg F)	Boiling Point (deg F)
			N(H)	N(F)	N(R)		
Triethanolamine	14	10.1	2	1	1	354	650
Triethylaluminum	29	16.9	3	4	3	-	365
Triethylamine	16	17.8	3	3	0	16	193
Triethylene Glycol	4	9.3	1	1	0	350	546
Triisobutylaluminum	29	18.9	3	4	3	32	414
Triisopropylbenzene	4	18.1	0	1	0	207	495
Trimethylaluminum	29	16.5	-	3	3	Ignites spontaneously in air	
Tripropylamine	10	17.8	2	2	0	105	313
Vinyl Acetate	24	9.7	2	3	2	18	163
Vinyl Acetylene	29	19.5	2	4	3	Gas	41
Vinyl Allyl Ether	24	15.5	2	3	2	< 68	153
Vinyl Butyl Ether	24	15.4	2	3	2	15	202
Vinyl Chloride	24	8.0	2	4	2	-108	7
4-Vinyl Cyclohexene	24	19.0	0	3	2	61	266
Vinyl Ethyl Ether	24	14.0	2	4	2	< -50	96
Vinylidene Chloride	24	4.2	2	4	2	0	89
Vinyl Toluene	24	17.5	2	2	2	125	334
p-Xylene	16	17.6	2	3	0	77	279
Zinc Chlorate	14	(2)	1	0	1	-	-
Zinc Stearate [8]	4	10.1	0	1	0	530	-

Footnotes: The net Heat of Combustion (Hc) is the value obtained when the water formed in the combustion is considered to be in the vapor state. When Hc is given in kcal/gm mole, it can be converted to BTU/lb by multiplying by 1800 and dividing by molecular weight.

[1] Vacuum distillation.

[6] MF is packaged material.

[2] Material oxidized to higher level of oxid:

[7] Hc equivalent to 6 times heat of decomposition. (Hd)

[3] Sublimes.

[8] Evaluate as a dust.

[4] Explodes on heating.

[9] Decomposes.

[5] Decomposes in water.

[10] After extended use > 600 deg. F., the flash point can potentially drop to 95 deg. F.

Seta = Setaflash Method (See NFPA 321)

NA= Not Applicable

TOC = Tag Open Cup Method

Other Flash Points determined by Tag Closed Cup Method (TCC).

* Trademark of the Dow Chemical Company

Fuente: Toledo (2016)

Anexo 8: Listas de comprobación ofrecidas por Casal (2001) para determinar las penalidades y bonificaciones.

-----DATOS NECESARIOS PARA EL CALCULO-----	
FACTORES GENERALES DE RIESGO	
A. Reacciones químicas exotérmicas:	
- Hidrogenación.....	0,30
- Hidrólisis.....	0,30
- Isomerización.....	0,30
- Sulfonación (ArH + H2SO4 = RSO3H + H2O).....	0,30
- Neutralización (ácido + base).....	0,30
- Alquilación (R + grupo alquilo).....	0,50
- Esterificación (ácido orgánico + alcohol).....	0,50
- Adición (ácido inorgánico + R insaturado):	
- Moderada.....	0,50
- Fuerte.....	0,75
- Oxidación:	
- Proceso de combustión.....	1,00
- Combinación con O2.....	0,50
- Combinación con un agente vigoroso.....	1,00
- Polimerización.....	0,50
- Condensación (R1 + R2 = R3 + H2O, HCl, etc.).....	0,50
- Halogenación (R + halógeno).....	1,00
- Nitración (RH + HNO3 = RNO2 + H2O).....	1,25
B. Procesos endotérmicos (aplicar sólo a reactores):	
- Energía con fuego directo (calcínación, pirólisis).....	0,40
- Energía sin fuego directo (Incluido electrolisis).....	0,20
- Pirólisis o cróquing.....	0,20
C. Manejo y transferencia de material:	
- Carga y descarga de líquidos con FP <= 37,8 C que implica co(desco)nexión de líneas (ej. mangueras).....	0,50
- Uso de centrifugas, reactores o tanques agitados semi-abiertos con materiales inflam. a la temp. de proceso.....	0,50
- Almacenamientos (al exterior o a cubierto):	
- Gases inflamables (botellas, Nf= 3 ó 4).....	0,85
- Líquidos (bidones, garrafas):	
Con FP <= 37,8 C (Nf = 3 ó 4).....	0,85
Con FP entre 37,8 - 60 C.....	0,25
- Sólidos (cajas, sacos, pilas):	
Gránulos <= 40 mm (Nf = 2).....	0,40
Espumas, fibras, polvo (Nf=3).....	0,65
- Factor adicional por ausencia de rociadores.....	0,20
D. Unidades de proceso en zonas cerradas (3 ó más lados cerrados sin aberturas en las bases):	
- Filtros y colectores de polvo combustible.....	0,50
- Equipos que procesan líquidos combustibles:	
- Entre FP - BP.....	****
- A temp. >= BP.....	****
- Factor de reducción por ventilación mecánica adecuada... ..	0,50
E. Accesos inadecuados para el equipo de emergencia:	
- Área de proceso >= 930 m2 con un sólo acceso.....	0,35
- Almacén >= 2312 m2 con un sólo acceso.....	0,35
F. Drenaje:	
- Cubeto sin drenaje.....	0,50
- Terreno plano o sin capacidad de drenaje.....	0,50
- El drenaje afecta a otras unidades o servicios.....	0,50
- Cubeto con drenaje sólo parcialmente adecuado.....	0,25
(El drenaje es plenamente adecuado si:	
i. Pendiente > 2% (tierra) o 1% (solera)	
ii. Balsa a > 8 m o un diámetro de tanque	
iii. Capacidad balsa > 75% capacidad unidad + agua contra incendios durante 30 min)	
FACTORES ESPECIALES DE RIESGO	
A. Toxicidad del material.....	****
B. Operación a vacío (no utilizar C y D):0,300,00	
- Material sensible a la humedad o el O2.....	0,50
- Riesgo de formación de mezclas inflamables.....	0,50
C. Operación en condiciones de inflamabilidad o próximas:	
- En tanques de almacenamiento con pulmonación al aire que contienen líquidos con FP <= 37,8 C (Nf = 3 ó 4).....	0,50
- En caso de fallo de instrumentos, equipo o purga.....	0,30
- En procesos u operaciones de forma permanente.....	0,80
- Descarga de cisternas (con líquidos inflamables a la temp. de operación) en circuito cerrado o inertizado.....	0,30
D. Explosión de polvo (partículas<=420 micras según NFPA).....	****
- Factor de reducción por uso de atmósfera de inerte.....	0,50
E. Presión de alivio (válvula seguridad, disco ruptura):	
Material:	
- Líquido inflamable/combustible con FP <= 60 C.....	****
- Muy viscoso (breas, lubricantes, asfaltos).....	****
- Gas comprimido.....	****
- Gas licuado (presión de vapor >= 2.8 bar 37.8 C).....	****
F. Baja temperatura:	
- Acero al carbono T < temperatura de transición.....	0,30
- Otros materiales a T < temperatura transición.....	0,20
G. Cantidad de material combustible:	
- Líquidos o gases en proceso:	
- MATERIAL ESTABLE de FP<=60C o procesado a temp.>=FP.....	****
- MATERIAL INESTABLE (Nr = 2, 3, 6 ó 4).....	****
- Líquidos o gases en almacenamiento:	
- MATERIAL ESTABLE:	
Gas licuado o gas.....	****
Líquido con FP <= 37,8 C.....	****
Líquido con FP entre 37,8 - 60 C.....	****
- MATERIAL INESTABLE.....	****
- Sólidos en almacenamiento:	
- MATERIAL ESTABLE:	

Densidad >= 160 kg/m3.....	****
Densidad < 160 kg/m3.....	****
-MATERIAL INESTABLE (Nr >=2).....	****
H. Corrosión y erosión:	
-Corrosión < 0.5 mm/año, picaduras o erosión local.....	0,10
-Corrosión entre 0.5 - 1 mm/año.....	0,20
-Corrosión > 1 mm/año.....	0,50
-Riesgo de rotura por fatiga del material.....	0,75
-Uso de revestimientos para prevenir la corrosión.....	0,20
J. Pérdidas de fluido combustible por cierres y juntas:	
-Pérdidas menores en sellos equipos rotativos y juntas.....	0,10
-Pérdida regular en sellos equipos rotativos y juntas.....	0,30
-Procesos con ciclos de presión o temperatura.....	0,30
-Pérdidas de fluidos penetrantes o abrasivos.....	0,40
-Presencia de mirillas o juntas de expansión.....	1,50
K. Presencia de hornos próximos a la unidad de proceso:	
-Quemador estándar (cámara a depresión):	
-Material a temp. entre FP - BP.....	****
-Material a temp. >= BP.....	****
-Quemador a sobrepresión. Toma de aire elevada (>3 m):	
-Material a temp. entre FP - BP.....	****
-Material a temp. >= BP.....	****
L. Uso de equipos de intercambio con aceite térmico:	
-Temp. operación entre FP - BP del aceite.....	****
-Temp. operación > BP del aceite.....	****
M. Equipos en rotación de gran potencia:	
-Unidad de proceso con bomba >= 75 HP (56 kW).....	0,50
-Unidad de proceso con compresor >= 600 HP (447 kW).....	0,50
-Agitadores y bombas de circulación cuyo fallo puede desarrollar un proceso exotérmico.....	0,50
-Equipos problemáticos con gran velocidad de giro (centrifugas, etc.).....	0,50

FACTORES DE BONIFICACION POR CONTROL DE PROCESO

a. Energía de emergencia (con conmutación automática) para los servicios esenciales de la unidad.....	0,98
b. Refrigeración durante 10 min. de condiciones anormales:	
-Capaz de evacuar el 100 % del calor previsto.....	0,99
-Capaz de evacuar el 150 % del calor previsto.....	0,97
c. Sistemas de alivio de:	
-Explosiones (de vapores o polvo).....	0,84
-Sobrepresiones por condiciones anormales.....	0,98
d. Parada de emergencia:	
-Automática activada por un sistema redundante.....	0,98
-De equipos rotativ. críticos (compresores,turbinas):	
MANUAL por alarma de detectores de vibración.....	0,99
AUTOMATICA por alarma de detectores de vibración.....	0,96
e. Control por computador:	
-Solo para asistencia del operador.....	0,99
-Con lógica "fallo seguro" ("fail safe").....	0,97
-Puntos críticos con entradas ("inputs") redundantes.....	0,93
-Impide salidas o señales de mando críticas.....	0,93
-Con posibilidad de mando directo por el operador.....	0,93
f. Gas inerte:	
-Para "blanketing" o "padding".....	0,96
-Para inertización total rápida en caso de emergencia.....	0,94
g. Instrucciones de operación escritas para:	
-Puesta en marcha.....	0,50
-Parada rutinaria.....	0,50
-Condiciones normales.....	0,50
-Operación a baja capacidad.....	0,50
-Operación a reciclo total ("standby").....	0,56
-Operación por encima de la capacidad de diseño.....	1,00
-Puesta en marcha después de una breve parada.....	1,00
-Puesta en marcha tras parada por mantenimiento.....	1,00
-Procedimientos de mantenimiento.....	1,50
-Parada de emergencia.....	1,50

-Modificación o adiciones al equipo o tuberías.....	2,00
-Condiciones anormales previsibles.....	3,00
-BONIFICACION TOTAL CALCULADA (I-X/150).....	1,00
h. Revisión bibliográfica sobre procesos y reactividad:	
-Ocasional.....	0,98
-Periódica y al día.....	0,91

FACTORES DE BONIFICACION POR AISLAMIENTO DEL MATERIAL

a. Válvulas de aislamiento operadas a distancia:	
-Con revisión anual.....	0,96
-Sin revisión anual.....	0,98
b. Depósito trasvase para emergencia ó venteos conducidos:	
-Depósito en el área de la unidad.....	0,98
-Depósito fuera del área de la unidad.....	0,96
-Venteos conducidos a antorcha o tanque cerrado.....	0,96
c. Drenajes:	
-Suelo con drenaje capaz de evacuar:	
-EI 75 % del contenido (pendiente >= 2 %).....	0,91
-EI 30 % del contenido.....	0,95
-Cubeto con drenaje a balsa (a distancia>diám. tanque).....	0,95
d. Sistema de bloqueo que impide flujo incorrecto que podría dar reacciones indeseables.....	0,98

FACTORES DE BONIFICACION POR PROTECCION CONTRA EL FUEGO

a. Detectores de fugas:	
-Que activan una alarma e identifican la zona.....	0,98
-Que activan un sistema de protección.....	0,94
b. Acero estructural:	
-Con recubrimiento ignífugo hasta:	
-Altura <= 5 m.....	0,98
-Altura entre 5 - 10 m.....	0,97
-Altura > 10 m.....	0,95
-Con refrigeración por agua:	
-Sistema de inundación ("deluge").....	0,98
-Sistema de pulverización ("sprinklers").....	0,97
c. Tanques:	
-Con doble pared.....	0,91
-Enterrados.....	0,84
d. Agua contra incendio (autonomía >= 4 h, >=50 % con bombas diesel):	
-Presión <= 7 bar.....	0,97
-Presión > 7 bar.....	0,94
e. Sistemas especiales: halón,CO2,detectores humo y llama.....	0,91
f. Rociadores:	
-Sistemas de inundación ("deluge").....	0,97
-Sistemas de pulverización:	
-Tubería húmeda:	
Riesgo ligero. Capacidad <= 8.5 l/(min m2).....	0,87
Riesgo ordinario. Capacidad 8.5 - 15 l/(min m2).....	0,81
Riesgo extra. Capacidad >15 l/(min m2).....	0,74
-Tubería seca:	
Riesgo ligero. Capacidad <= 8.5 l/(min m2).....	0,87
Riesgo ordinario. Capacidad 8.5 - 15 l/(min m2).....	0,84
Riesgo extra. Capacidad >15 l/(min m2).....	0,81
-Factor multiplicador para área > 930 m2:	
930 - 1860 m2.....	1,06
1860 - 2790 m2.....	1,09
>2790 m2.....	1,12
g. Cortinas de agua (distancladas a >= 23 m):	
-1 cortina de altura <= 5 m.....	0,98
-2 cortinas:1a. de altura H<=5 m, 2a. de altura<=H+2 m.	0,97
h. Espuma:	
-Por rociadores ("sprinklers") de funcionamiento:	
-MANUAL.....	0,94
-AUTOMATICO.....	0,92
-En juntas techos flotantes de depósitos con disparo:	

-MANUAL.....	0,97	F1. Factor general de riesgo.....	
-AUTOMATICO (activado por detectores de llama).....	0,94	F2. Factor especial de riesgo.....	
-En depósitos:		F3. Factor de riesgo (F1 x F2).....	
-Dentro de la cámara de aire.....	0,95	A-1. Índice de incendio y explosión (F3 x MF).....	
-AUTOMATICO sobre la carcasa (monitores, etc.).....	0,97	A-2. Radio de exposición (m).....	
-MANUAL sobre la carcasa (mangueras, etc.).....	0,94	A-3. Valor del área de exposición (mill. de \$ de 1986).....	
j. Extintores portátiles - monitores:		B. FACTOR DE DAÑO.....	
-Extintores portátiles.....	0,98	C. MPPD Básico (A-3 x B, en mill. de \$ de 1986).....	
-Extintores portátiles y monitores manuales.....	0,97	D. FACTOR DE BONIFICACION EFECTIVO	
-Extintores portátiles y monitores telecomandados.....	0,95	C1. Factor de bonificación por control de proceso.....	
k. Protección de cables:		C2. Factor de bonific. por protección contra el fuego.....	
-Bandejas con sistemas de agua pulverizada.....	0,98	Factor de bonificación (C1xC2xC3).....	
-Bandejas enterradas.....	0,94	E. MPPD Efectivo (C x D, en mill. de \$ de 1986).....	
RESUMEN DEL ANALISIS DE RIESGO		F. DIAS PERDIDOS (MPDO)	
CORRECCION DEL FACTOR DE MATERIAL POR TEMPERATURA		Margen superior con un 70% de probabilidad.....	
-Número "NFPA" de incendio (NI) corregido.....		Valor medio.....	
-Número "NFPA" de reactividad (Nr) corregido.....		Margen inferior con un 70% de probabilidad.....	
-Factor de material (MF) a la temperatura de operación.....			
A. INDICE DE INCENDIO Y EXPLOSION			

Fuente: Toledo (2016)

Anexo 9: Factores de Penalización.

a) Riesgos generales del proceso.

Riesgos generales del proceso (P)	Rango
Manipulación y cambios físicos	10 a 60
Características de la reacción	25 a 60
Reacción batch	10 a 60
Multiplicidad de reacciones	25 a 75
Desplazamiento del material	0 a 150
Contenedores transportables	10 a 100
Factor de Riesgos Generales del Proceso (P)	

Fuente: Arencibia (2018)

b) Riesgos especiales del proceso.

Riesgos especiales del proceso (S)	Rango
Presión baja ($P < 15$ psia)	50 a 150
Presión alta (p)	0 a 150
Temperatura baja (CS $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$)	0 a 30
Temperatura baja (CS a $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$)	30 a 100
Temperatura baja (Otros materiales)	0 a 100
Temperatura alta (Material inflamable)	0 a 35
Temperatura alta (Resistencia del material)	0 a 100
Corrosión y erosión	0 a 400
Fugas por juntas y cierres	0 a 60
Vibración y fatiga	0 a 100
Proceso/Reacciones difíciles de controlar	20 a 300
Operación cerca/en el rango de inflamabilidad	25 a 450
Riesgo de explosión superior al valor medio	40 a 100
Riesgo de explosión por polvo o neblina	30 a 70
Oxidantes potentes	0 a 100
Sensibilidad del proceso a la ignición	0 a 400
Riesgo de electricidad estática	10 a 200
Factor de Riesgos Especiales del Proceso (S)	

Fuente: Arencibia (2018)

c) Riesgos asociados a las cantidades.

Riesgos asociado a las cantidades (Q)	
Cantidad total de material (K) [t]	
Factor de Cantidad (Q)	

Fuente: Arencibia (2018)

d) Riesgos de implantación.

Riesgos de implantación (L)	
Altura (H) [m]	
Área de trabajo (N) [m ²]	
	RANGO
Diseño de la estructura	0 a 200
Efecto dominó	0 a 250
Bajo tierra	50 a 150
Superficie de drenaje	0 a 100
Otros	50 a 250
Factor de Riesgos asociados a la Distribución en Planta (L)	

Fuente: Arencibia (2018)

e) Riesgos graves para la salud.

Riesgos graves a la salud (T)	RANGO
Efectos sobre la piel	0 a 300
Efectos por inhalación	0 a 150
Factor de Riesgos Graves a la Salud (T)	

Fuente: Arencibia (2018)

Anexo 10: Factores de bonificación.

a) Riesgos asociados a la contención

Riesgos asociados a la contención (K1)	Rango
Tanques a presión	0,8 a 0,9
Tanques verticales	0,8 a 0,9
Tuberías de transferencia	0,6 a 0,9
Otras barreras adicionales	0,45 a 0,9
Detección y control de fugas	0,7 a 0,95
Venteos de emergencia	0,9 a 0,95
Factor de Bonificación por Contención (K1)	

Fuente: Arencibia (2018)

b) Riesgos asociados al Control de Procesos

Control de procesos (K2)	Rango
Sistema de alarmas	0,9 a 0,95
Generadores de emergencia	0,9
Sistema de enfriado de emergencia	0,9 a 0,95
Sistema de gases de inertización	0,8 a 0,95
Estudio de actividades peligrosas	0,7
Paradas de seguridad reguladas	0,7 a 0,9
Control automático por ordenador	0,85 a 0,96
Protección contra reacciones fuera de control	0,8 a 0,95
Procedimientos normalizados de operación	0,75 a 1
Vigilancia de la planta	0,9 a 0,97
Factor de Bonificación por Control del Proceso (K2)	

Fuente: Arencibia (2018)

c) Actitud frente a temas de seguridad

Actitud frente a temas de seguridad (K3)	Rango
Implicación de la gerencia	0,9 a 0,95
Entrenamientos de seguridad	0,85 a 0,95
Procedimientos de mantenimiento y seguridad	0,8 a 0,97
Factor de Bonificación por Actitud por la Seguridad (K3)	

Fuente: Arencibia (2018)

d) Protección contra fuego

Protección física contra fuegos (K4)	Rango
Protección de la estructura	0,8 a 0,98
Muros cortafuegos	0,8 a 0,97
Equipamiento de protección	0,5 a 0,97
Factor de Bonificación por Protección Física Contra Fuegos (K4)	

Fuente: Arencibia (2018)

e) Aislamiento del material

Aislamiento del material (K5)	Rango
Sistema de válvulas	0,65 a 0,9
Ventilación	0,9
Factor de Bonificación por Aislamiento del Material (K5)	

Fuente: Arencibia (2018)

f) Combate contra incendios

Equipo de intervención contra incendio (K6)	Rango
Alarma de incendio	0,9 a 0,98
Extintores	0,85 a 0,95
Suministro de agua	0,75 a 1
Sistema de monitores o rociadores	0,87 a 0,97
Espuma y otros inertizantes	0,7 a 0,9
Brigada contra incendio	0,7 a 0,9
Cooperación Exterior	0,85 a 0,9
Ventilación de humos	0,8 a 0,9
Factor de Bonificación por Lucha Contra Incendio (K6)	

Fuente: Arencibia (2018)

Anexo 11: Resultado de los factores de bonificación desde K₁ hasta K₆ para todas las unidades de procesos de la planta.

a) Riesgos asociados a la contención

RIESGOS ASOCIADOS A LA CONTENCIÓN (K1)	RANGO	VALOR
Tanques a presión	0,8 a 0,9	0,8
Tanques verticales	0,8 a 0,9	1
Tuberías de transferencia	0,6 a 0,9	0,7
Otras barreras adicionales	0,45 a 0,9	0,45
Detección y control de fugas	0,7 a 0,95	0,85
Venteos de emergencia	0,9 a 0,95	0,9
Factor de Bonificación por Contención (K1)		0,19

Fuente: Elaboración propia

b) Riesgos asociados al Control de Procesos

CONTROL DE PROCESO (K2)	RANGO	VALOR
Sistema de alarmas	0,9 a 0,95	0,9
Generadores de emergencia	0,9	0,9
Sistema de enfriado de emergencia	0,9 a 0,95	0,9
Sistema de gases de inertización	0,8 a 0,95	0,9
Estudio de actividades peligrosas	0,7	0,7
Paradas de seguridad reguladas	0,7 a 0,9	0,85
Control automático por ordenador	0,85 a 0,96	0,95
Protección contra reacciones fuera de control	0,8 a 0,95	0,85
Procedimientos normalizados de operación	0,88 a 0,97	0,75
Vigilancia de la planta	0,9 a 0,97	0,92
Factor de Bonificación por Control del Proceso (K2)		0,22

Fuente: Elaboración propia

c) Actitud frente a temas de seguridad

ACTITUD FRENTE A TEMAS DE SEGURIDAD (K3)	RANGO	VALOR
Implicación de la gerencia	0,9 a 0,95	0,9
Entrenamientos de seguridad	0,80 a 0,95	0,85
Procedimientos de mantenimiento y seguridad	0,8 a 0,97	0,8
Factor de Bonificación por Actitud por la Seguridad (K3)		0,61

Fuente: Elaboración propia

d) Protección contra fuego

PROTECCIÓN FÍSICA CONTRA FUEGOS (K4)	RANGO	VALOR
Protección de la estructura	0,8 a 0,98	0,9
Muros cortafuegos	0,8 a 0,97	0,9
Equipamiento de protección	0,5 a 0,97	0,8
Factor de Bonificación por Protección Física Contra Fuegos (K4)		0,65

Fuente: Elaboración propia

e) Aislamiento del material

AISLAMIENTO DEL MATERIAL (K5)	RANGO	VALOR
Sistema de válvulas	0,65 a 0,9	0,72
Ventilación	0,9	0,9
Factor de Bonificación por Aislamiento del Material (K5)		0,65

Fuente: Elaboración propia

f) Combate contra incendios

EQUIPO DE INTERVENCIÓN CONTRA INCENDIOS (K6)	RANGO	VALOR
Alarma de incendio	0,9 a 0,98	0,9
Extintores	0,85 a 0,95	0,85
Suministro de agua	0,75 a 1	0,75
Sistema de monitores o rociadores	0,7 a 0,95	0,87
Espuma y otros inertizantes	0,7 a 0,9	0,7
Brigada contra incendio	0,7 a 0,9	0,7
Cooperación Exterior	0,85 a 0,9	0,85
Ventilación de humos	0,9	0,8
Factor de Bonificación por Lucha Contra Incendio (K6)		0,17

Fuente: Elaboración propia

Anexo 12: Resultado de los riesgos generales del proceso (F₁) y los riesgos especiales (F₂) para las unidades de proceso N°2 y N°3.

Evaluación de Riesgos generales del proceso (F1)	Rango	Valor
Reacciones químicas Exotérmicas	0,3 a 1,25	0
Procesos Endotérmicos	0,2	0
Manejo y Transferencia de materia	0,25 a 0,85	0,85
Unidades de proceso encerradas o interiores	0,3 a 0,9	0
Acceso en caso de fuego	0,2 a 0,35	0
Control de derrames y sistema de drenaje	0,5	0,5
	F1	1,35

Fuente: Elaboración propia.

Riesgos Especiales del proceso (F2)	Rango	Valor
Material tóxico	0 a 0,1	0,2
Presión sub- atmosférica	0,5	0
Operación dentro o cerca de la temperatura de inflamación	0,3 a 0,8	0
Explosión de polvos	0,25 a 2	0
Alivio de presión	ecuac ó	
	fig 2.2 metodología	0
Baja temperatura		0
Cantidad de material inflamable	fig 2,3, 2.4 o 2.5	0,62
Corrosión y erosión	0,1 a 0,75	0,5
Fugas a través de Juntas y empacaduras	0,5 a 1,5	0,1
Uso de equipos con fuego	1 o fig 2.6	1
Sistemas de intercambio de calor con aceite caliente	0,15 a 1,15	0
Equipo rotativo	0,5	0
	F2	2,42

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 13: Resultado de los riesgos especiales del material (M), los riesgos generales del proceso (P), los riesgos especiales del proceso (S), los riesgos asociados a las cantidades (Q), los riesgos asociados a la distribución en la planta (L) y los riesgos de toxicidad (T) para las unidades de proceso N°2 y N°3.

RIESGOS ESPECIALES DEL MATERIAL (M)	RANGO	VALOR
Productos oxidantes	0 a 20	0
Dar lugar a gas combustible	0 a 30	0
Características de mezcla y dispersión (m)	-50 a 100	-20
Puede inflamarse espontáneamente	30 a 250	100
Puede polimerizarse espontáneamente	25 a 75	0
Sensibilidad a la ignición	-75 a 150	50
Puede dar descomposición explosiva	75 a 125	125
Puede dar lugar a detonación del gas	0 a 150	0
Propiedades de la fase condensada	200 a 1500	0
Otros	0 a 150	0
Factor de Riesgos Especiales del Material (M)		255

Fuente: Elaboración propia.

RIESGOS GENERALES DEL PROCESO (P)	RANGO	VALOR
Manipulación y cambios físicos	10 a 60	50
Características de la reacción	25 a 60	0
Reacción batch	10 a 60	0
Multiplicidad de reacciones	25 a 75	0
Desplazamiento del material	0 a 150	0
Contenedores transportables	10 a 100	0
Factor de Riesgos Generales del Proceso (P)		50

Fuente: Elaboración propia.

RIESGOS ESPECIALES DEL PROCESO (S)	RANGO	VALOR
Presión baja (P < 15 psia)	50 a 150	100
Presión alta (p)	0 a 150	0
Temperatura baja (CS 10 °C a -25°C)	0 a 30	0
Temperatura baja (CS a -25°C)	30 a 100	0
Temperatura baja (Otros materiales)	0 a 100	0
Temperatura alta (Material inflamable)	0 a 35	0
Temperatura alta (Resistencia del material)	0 a 100	0
Corrosión y erosión	0 a 400	100
Fugas por juntas y cierres	0 a 60	30

Vibración y fatiga	0 a 100	30
Proceso/Reacciones difíciles de controlar	20 a 300	0
Operación cerca/en el rango de inflamabilidad	25 a 450	50
Riesgo de explosión superior al valor medio	40 a 100	40
Riesgo de explosión por polvo o neblina	30 a 70	50
Oxidantes potentes	0 a 100	0
Sensibilidad del proceso a la ignición	0 a 400	25
Riesgo de electricidad estática	10 a 200	100
Factor de Riesgos Especiales del Proceso (S)		525

Fuente: Elaboración propia.

RIESGOS ASOCIADO A LAS CANTIDADES (Q)	VALOR
Cantidad total de material (K) [t]	8 616,50
Factor de Cantidad (Q)	330,00

Fuente: Elaboración propia.

RIESGOS ASOCIADOS A LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA (L)		VALOR
Altura (H) [m]		12
Área de trabajo (N) [m ²]		1 310,06
	RANGO	VALOR
Diseño de la estructura	0 a 200	15
Efecto dominó	0 a 250	0
Bajo tierra	50 a 150	0
Superficie de drenaje	0 a 100	100
Otros	50 a 250	50
Factor de Riesgos asociados a la Distribución en Planta (L)		165

Fuente: Elaboración propia.

RIESGOS DE TOXICIDAD (T)	RANGO	VALOR
Efectos sobre la piel	0 a 300	0
Efectos por inhalación	0 a 150	150
Factor de Riesgos de toxicidad (T)		150

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 14: Resultado de los riesgos generales del proceso (F₁) y los riesgos especiales (F₂) para la unidad de proceso N°4.

Evaluación de Riesgos generales del proceso (F1)	Rango	Valor
Reacciones químicas Exotérmicas	0,3 a 1,25	0
Procesos Endotérmicos	0,2	0
Manejo y Transferencia de materia	0,25 a 0,85	0,85
Unidades de proceso encerradas o interiores	0,3 a 0,9	0
Acceso en caso de fuego	0,2 a 0,35	0
Control de derrames y sistema de drenaje	0,5	0,5
	F1	1,35

Fuente: Elaboración propia.

Riesgos Especiales del proceso (F2)	Rango	Valor
Material tóxico	0 a 0,1	0,2
Presión sub- atmosférica	0.5	0
Operación dentro o cerca de la temperatura de inflamación	0,3 a 0,8	0
Explosión de polvos	0,25 a 2	0
Alivio de presión	ecuac ó	
	fig 2.2 metodología	0
Baja temperatura		0
Cantidad de material inflamable	fig 2,3, 2.4 o 2.5	0,65
Corrosión y erosión	0,1 a 0,75	0,5
Fugas a través de Juntas y empacaduras	0,5 a 1,5	0,1
Uso de equipos con fuego	1 o fig 2.6	1
Sistemas de intercambio de calor con aceite caliente	0,15 a 1,15	0
Equipo rotativo	0,5	0
	F2	2,45

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 15: Resultado de los riesgos especiales del material (M), los riesgos generales del proceso (P), los riesgos especiales del proceso (S), los riesgos asociados a las cantidades (Q), los riesgos asociados a la distribución en la planta (L) y los riesgos de toxicidad (T) para la unidad de proceso N°4.

RIESGOS ESPECIALES DEL MATERIAL (M)	RANGO	VALOR
Productos oxidantes	0 a 20	0
Dar lugar a gas combustible	0 a 30	0
Características de mezcla y dispersión (m)	-50 a 100	-20
Puede inflamarse espontáneamente	30 a 250	100
Puede polimerizarse espontáneamente	25 a 75	0
Sensibilidad a la ignición	-75 a 150	50
Puede dar descomposición explosiva	75 a 125	125
Puede dar lugar a detonación del gas	0 a 150	0
Propiedades de la fase condensada	200 a 1500	0
Otros	0 a 150	0
Factor de Riesgos Especiales del Material (M)		255

Fuente: Elaboración propia.

RIESGOS GENERALES DEL PROCESO (P)	RANGO	VALOR
Manipulación y cambios físicos	10 a 60	50
Características de la reacción	25 a 60	0
Reacción batch	10 a 60	0
Multiplicidad de reacciones	25 a 75	0
Desplazamiento del material	0 a 150	0
Contenedores transportables	10 a 100	0
Factor de Riesgos Generales del Proceso (P)		50

Fuente: Elaboración propia.

RIESGOS ESPECIALES DEL PROCESO (S)	RANGO	VALOR
Presión baja (P < 15 psia)	50 a 150	100
Presión alta (p)	0 a 150	0
Temperatura baja (CS 10 °C a -25°C)	0 a 30	0
Temperatura baja (CS a -25°C)	30 a 100	0
Temperatura baja (Otros materiales)	0 a 100	0
Temperatura alta (Material inflamable)	0 a 35	0
Temperatura alta (Resistencia del material)	0 a 100	0
Corrosión y erosión	0 a 400	100
Fugas por juntas y cierres	0 a 60	30

Vibración y fatiga	0 a 100	30
Proceso/Reacciones difíciles de controlar	20 a 300	0
Operación cerca/en el rango de inflamabilidad	25 a 450	50
Riesgo de explosión superior al valor medio	40 a 100	40
Riesgo de explosión por polvo o neblina	30 a 70	50
Oxidantes potentes	0 a 100	0
Sensibilidad del proceso a la ignición	0 a 400	25
Riesgo de electricidad estática	10 a 200	100
Factor de Riesgos Especiales del Proceso (S)		525

Fuente: Elaboración propia.

RIESGOS ASOCIADO A LAS CANTIDADES (Q)	VALOR
Cantidad total de material (K) [t]	1 6779,50
Factor de Cantidad (Q)	430,00

Fuente: Elaboración propia.

RIESGOS ASOCIADOS A LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA (L)		VALOR
Altura (H) [m]		11.95
Área de trabajo (N) [m ²]		2 209
	RANGO	VALOR
Diseño de la estructura	0 a 200	15
Efecto dominó	0 a 250	0
Bajo tierra	50 a 150	0
Superficie de drenaje	0 a 100	100
Otros	50 a 250	50
Factor de Riesgos asociados a la Distribución en Planta (L)		165

Fuente: Elaboración propia.

RIESGOS DE TOXICIDAD (T)	RANGO	VALOR
Efectos sobre la piel	0 a 300	0
Efectos por inhalación	0 a 150	150
Factor de Riesgos de toxicidad (T)		150

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 16: Resultado de los riesgos generales del proceso (F₁) y los riesgos especiales (F₂) para las unidades de proceso N°5 y N°6.

Evaluación de Riesgos generales del proceso (F1)	Rango	Valor
Reacciones químicas Exotérmicas	0,3 a 1,25	0
Procesos Endotérmicos	0,2	0
Manejo y Transferencia de materia	0,25 a 0,85	0,85
Unidades de proceso encerradas o interiores	0,3 a 0,9	0
Acceso en caso de fuego	0,2 a 0,35	0
Control de derrames y sistema de drenaje	0,5	0,5
	F1	1,35

Fuente: Elaboración propia.

Riesgos Especiales del proceso (F2)	Rango	Valor
Material tóxico	0 a 0,1	0,2
Presión sub- atmosférica	0,5	0
Operación dentro o cerca de la temperatura de inflamación	0,3 a 0,8	0
Explosión de polvos	0,25 a 2	0
Alivio de presión	ecuac ó	
	fig 2.2 metodología	0
Baja temperatura		0
Cantidad de material inflamable	fig 2,3, 2.4 o 2.5	0,6
Corrosión y erosión	0,1 a 0,75	0,5
Fugas a través de Juntas y empacaduras	0,5 a 1,5	0,1
Uso de equipos con fuego	1 o fig 2.6	1
Sistemas de intercambio de calor con aceite caliente	0,15 a 1,15	0
Equipo rotativo	0,5	0
	F2	2,4

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 17: Resultado de los riesgos especiales del material (M), los riesgos generales del proceso (P), los riesgos especiales del proceso (S), los riesgos asociados a las cantidades (Q), los riesgos asociados a la distribución en la planta (L) y los riesgos de toxicidad (T) para las unidades de proceso N°5 y N°6.

RIESGOS ESPECIALES DEL MATERIAL (M)	RANGO	VALOR
Productos oxidantes	0 a 20	0
Dar lugar a gas combustible	0 a 30	0
Características de mezcla y dispersión (m)	-50 a 100	-20
Puede inflamarse espontáneamente	30 a 250	100
Puede polimerizarse espontáneamente	25 a 75	0
Sensibilidad a la ignición	-75 a 150	50
Puede dar descomposición explosiva	75 a 125	125
Puede dar lugar a detonación del gas	0 a 150	0
Propiedades de la fase condensada	200 a 1500	0
Otros	0 a 150	0
Factor de Riesgos Especiales del Material (M)		255

Fuente: Elaboración propia.

RIESGOS GENERALES DEL PROCESO (P)	RANGO	VALOR
Manipulación y cambios físicos	10 a 60	50
Características de la reacción	25 a 60	0
Reacción batch	10 a 60	0
Multiplicidad de reacciones	25 a 75	0
Desplazamiento del material	0 a 150	0
Contenedores transportables	10 a 100	0
Factor de Riesgos Generales del Proceso (P)		50

Fuente: Elaboración propia.

RIESGOS ESPECIALES DEL PROCESO (S)	RANGO	VALOR
Presión baja (P < 15 psia)	50 a 150	100
Presión alta (p)	0 a 150	0
Temperatura baja (CS 10 °C a -25°C)	0 a 30	0
Temperatura baja (CS a -25°C)	30 a 100	0
Temperatura baja (Otros materiales)	0 a 100	0
Temperatura alta (Material inflamable)	0 a 35	0
Temperatura alta (Resistencia del material)	0 a 100	0
Corrosión y erosión	0 a 400	100
Fugas por juntas y cierres	0 a 60	30

Vibración y fatiga	0 a 100	30
Proceso/Reacciones difíciles de controlar	20 a 300	0
Operación cerca/en el rango de inflamabilidad	25 a 450	50
Riesgo de explosión superior al valor medio	40 a 100	40
Riesgo de explosión por polvo o neblina	30 a 70	50
Oxidantes potentes	0 a 100	0
Sensibilidad del proceso a la ignición	0 a 400	25
Riesgo de electricidad estática	10 a 200	100
Factor de Riesgos Especiales del Proceso (S)		525

Fuente: Elaboración propia.

RIESGOS ASOCIADO A LAS CANTIDADES (Q)	VALOR
Cantidad total de material (K) [t]	3 346,83
Factor de Cantidad (Q)	240,00

Fuente: Elaboración propia.

RIESGOS ASOCIADOS A LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA (L)		VALOR
Altura (H) [m]		11,95
Área de trabajo (N) [m ²]		616,03
	RANGO	VALOR
Diseño de la estructura	0 a 200	15
Efecto dominó	0 a 250	0
Bajo tierra	50 a 150	0
Superficie de drenaje	0 a 100	100
Otros	50 a 250	50
Factor de Riesgos asociados a la Distribución en Planta (L)		165

Fuente: Elaboración propia.

RIESGOS DE TOXICIDAD (T)	RANGO	VALOR
Efectos sobre la piel	0 a 300	0
Efectos por inhalación	0 a 150	150
Factor de Riesgos de toxicidad (T)		150

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 18: Resultado de los riesgos generales del proceso (F₁) y los riesgos especiales (F₂) para las unidades de proceso N°7, N°8, N°9 y N°10.

Evaluación de Riesgos generales del proceso (F1)	Rango	Valor
Reacciones químicas Exotérmicas	0,3 a 1,25	0
Procesos Endotérmicos	0,2	0
Manejo y Transferencia de materia	0,25 a 0,85	0,85
Unidades de proceso encerradas o interiores	0,3 a 0,9	0
Acceso en caso de fuego	0,2 a 0,35	0
Control de derrames y sistema de drenaje	0,5	0,5
	F1	1,35

Fuente: Elaboración propia.

Riesgos Especiales del proceso (F2)	Rango	Valor
Material tóxico	0 a 0,1	0,2
Presión sub- atmosférica	0,5	0
Operación dentro o cerca de la temperatura de inflamación	0,3 a 0,8	0
Explosión de polvos	0,25 a 2	0
Alivio de presión	ecuac ó	
	fig 2.2 metodología	0
Baja temperatura		0
Cantidad de material inflamable	fig 2,3, 2.4 o 2.5	0,605
Corrosión y erosión	0,1 a 0,75	0,5
Fugas a través de Juntas y empacaduras	0,5 a 1,5	0,1
Uso de equipos con fuego	1 o fig 2.6	1
Sistemas de intercambio de calor con aceite caliente	0,15 a 1,15	0
Equipo rotativo	0,5	0
	F2	2,405

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 19: Resultado de los riesgos especiales del material (M), los riesgos generales del proceso (P), los riesgos especiales del proceso (S), los riesgos asociados a las cantidades (Q), los riesgos asociados a la distribución en la planta (L) y los riesgos de toxicidad (T) para las unidades de proceso N°7, N°8, N°9 y N°10.

RIESGOS ESPECIALES DEL MATERIAL (M)	RANGO	VALOR
Productos oxidantes	0 a 20	0
Dar lugar a gas combustible	0 a 30	0
Características de mezcla y dispersión (m)	-50 a 100	-20
Puede inflamarse espontáneamente	30 a 250	100
Puede polimerizarse espontáneamente	25 a 75	0
Sensibilidad a la ignición	-75 a 150	50
Puede dar descomposición explosiva	75 a 125	125
Puede dar lugar a detonación del gas	0 a 150	0
Propiedades de la fase condensada	200 a 1500	0
Otros	0 a 150	0
Factor de Riesgos Especiales del Material (M)		255

Fuente: Elaboración propia.

RIESGOS GENERALES DEL PROCESO (P)	RANGO	VALOR
Manipulación y cambios físicos	10 a 60	50
Características de la reacción	25 a 60	0
Reacción batch	10 a 60	0
Multiplicidad de reacciones	25 a 75	0
Desplazamiento del material	0 a 150	0
Contenedores transportables	10 a 100	0
Factor de Riesgos Generales del Proceso (P)		50

Fuente: Elaboración propia.

RIESGOS ESPECIALES DEL PROCESO (S)	RANGO	VALOR
Presión baja (P < 15 psia)	50 a 150	100
Presión alta (p)	0 a 150	0
Temperatura baja (CS 10 °C a -25°C)	0 a 30	0
Temperatura baja (CS a -25°C)	30 a 100	0
Temperatura baja (Otros materiales)	0 a 100	0
Temperatura alta (Material inflamable)	0 a 35	0
Temperatura alta (Resistencia del material)	0 a 100	0
Corrosión y erosión	0 a 400	100
Fugas por juntas y cierres	0 a 60	30

Vibración y fatiga	0 a 100	30
Proceso/Reacciones difíciles de controlar	20 a 300	0
Operación cerca/en el rango de inflamabilidad	25 a 450	50
Riesgo de explosión superior al valor medio	40 a 100	40
Riesgo de explosión por polvo o neblina	30 a 70	50
Oxidantes potentes	0 a 100	0
Sensibilidad del proceso a la ignición	0 a 400	25
Riesgo de electricidad estática	10 a 200	100
Factor de Riesgos Especiales del Proceso (S)		525

Fuente: Elaboración propia.

RIESGOS ASOCIADO A LAS CANTIDADES (Q)	VALOR
Cantidad total de material (K) [t]	3 809,40
Factor de Cantidad (Q)	230,00

Fuente: Elaboración propia.

RIESGOS ASOCIADOS A LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA (L)		VALOR
Altura (H) [m]		10,28
Área de trabajo (N) [m ²]		617,52
	RANGO	VALOR
Diseño de la estructura	0 a 200	15
Efecto dominó	0 a 250	0
Bajo tierra	50 a 150	0
Superficie de drenaje	0 a 100	100
Otros	50 a 250	50
Factor de Riesgos asociados a la Distribución en Planta (L)		165

Fuente: Elaboración propia.

RIESGOS DE TOXICIDAD (T)	RANGO	VALOR
Efectos sobre la piel	0 a 300	0
Efectos por inhalación	0 a 150	150
Factor de Riesgos de toxicidad (T)		150

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 20: Resultado de los riesgos generales del proceso (F₁) y los riesgos especiales (F₂) para las unidades de proceso N°11, N°12, N°13 y N°14.

Evaluación de Riesgos generales del proceso (F1)	Rango	Valor
Reacciones químicas Exotérmicas	0,3 a 1,25	0
Procesos Endotérmicos	0,2	0
Manejo y Transferencia de materia	0,25 a 0,85	0,85
Unidades de proceso encerradas o interiores	0,3 a 0,9	0
Acceso en caso de fuego	0,2 a 0,35	0
Control de derrames y sistema de drenaje	0,5	0,5
	F1	1,35

Fuente: Elaboración propia.

Riesgos Especiales del proceso (F2)	Rango	Valor
Material tóxico	0 a 0,1	0,2
Presión sub- atmosférica	0,5	0
Operación dentro o cerca de la temperatura de inflamación	0,3 a 0,8	0
Explosión de polvos	0,25 a 2	0
Alivio de presión	ecuac ó	
	fig 2.2 metodología	0
Baja temperatura		0
Cantidad de material inflamable	fig 2,3, 2.4 o 2.5	0,78
Corrosión y erosión	0,1 a 0,75	0,5
Fugas a través de Juntas y empaaduras	0,5 a 1,5	0,1
Uso de equipos con fuego	1 o fig 2.6	1
Sistemas de intercambio de calor con aceite caliente	0,15 a 1,15	0
Equipo rotativo	0,5	0
	F2	2,58

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 21: Resultado de los riesgos especiales del material (M), los riesgos generales del proceso (P), los riesgos especiales del proceso (S), los riesgos asociados a las cantidades (Q), los riesgos asociados a la distribución en la planta (L) y los riesgos de toxicidad (T) para las unidades de proceso N°11, N°12, N°13 y N°14.

RIESGOS ESPECIALES DEL MATERIAL (M)	RANGO	VALOR
Productos oxidantes	0 a 20	0
Dar lugar a gas combustible	0 a 30	0
Características de mezcla y dispersión (m)	-50 a 100	-20
Puede inflamarse espontáneamente	30 a 250	100
Puede polimerizarse espontáneamente	25 a 75	0
Sensibilidad a la ignición	-75 a 150	50
Puede dar descomposición explosiva	75 a 125	125
Puede dar lugar a detonación del gas	0 a 150	0
Propiedades de la fase condensada	200 a 1500	0
Otros	0 a 150	0
Factor de Riesgos Especiales del Material (M)		255

Fuente: Elaboración propia.

RIESGOS GENERALES DEL PROCESO (P)	RANGO	VALOR
Manipulación y cambios físicos	10 a 60	50
Características de la reacción	25 a 60	0
Reacción batch	10 a 60	0
Multiplicidad de reacciones	25 a 75	0
Desplazamiento del material	0 a 150	0
Contenedores transportables	10 a 100	0
Factor de Riesgos Generales del Proceso (P)		50

Fuente: Elaboración propia.

RIESGOS ESPECIALES DEL PROCESO (S)	RANGO	VALOR
Presión baja (P < 15 psia)	50 a 150	100
Presión alta (p)	0 a 150	0
Temperatura baja (CS 10 °C a -25°C)	0 a 30	0
Temperatura baja (CS a -25°C)	30 a 100	0
Temperatura baja (Otros materiales)	0 a 100	0
Temperatura alta (Material inflamable)	0 a 35	0
Temperatura alta (Resistencia del material)	0 a 100	0
Corrosión y erosión	0 a 400	100
Fugas por juntas y cierres	0 a 60	30

Vibración y fatiga	0 a 100	30
Proceso/Reacciones difíciles de controlar	20 a 300	0
Operación cerca/en el rango de inflamabilidad	25 a 450	50
Riesgo de explosión superior al valor medio	40 a 100	40
Riesgo de explosión por polvo o neblina	30 a 70	50
Oxidantes potentes	0 a 100	0
Sensibilidad del proceso a la ignición	0 a 400	25
Riesgo de electricidad estática	10 a 200	100
Factor de Riesgos Especiales del Proceso (S)		525

Fuente: Elaboración propia.

RIESGOS ASOCIADO A LAS CANTIDADES (Q)	VALOR
Cantidad total de material (K) [t]	172,33
Factor de Cantidad (Q)	90,00

Fuente: Elaboración propia.

RIESGOS ASOCIADOS A LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA (L)		VALOR
Altura (H) [m]		5,964
Área de trabajo (N) [m ²]		74,30
	RANGO	VALOR
Diseño de la estructura	0 a 200	15
Efecto dominó	0 a 250	0
Bajo tierra	50 a 150	0
Superficie de drenaje	0 a 100	100
Otros	50 a 250	50
Factor de Riesgos asociados a la Distribución en Planta (L)		165

Fuente: Elaboración propia.

RIESGOS DE TOXICIDAD (T)	RANGO	VALOR
Efectos sobre la piel	0 a 300	0
Efectos por inhalación	0 a 150	150
Factor de Riesgos de toxicidad (T)		150

Fuente: Elaboración propia.