

**SEGURIDAD INHERENTE CON RESPECTO AL PELIGRO DE LIBERACIÓN
TÓXICA: COMPARACIÓN DE DOS ALTERNATIVAS DEL PROCESO DE
ALQUILACIÓN**

ALBA LUCÍA PINEDA SOLANO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2008

**SEGURIDAD INHERENTE CON RESPECTO AL PELIGRO DE LIBERACIÓN
TÓXICA: COMPARACIÓN DE DOS ALTERNATIVAS DEL PROCESO DE
ALQUILACIÓN**

ALBA LUCÍA PINEDA SOLANO

**Trabajo de Grado para optar al Título de
Ingeniero Químico**

Director

**Ph.D M. SAM MANNAN
Texas A&M University**

Lector

**PhD. LEONARDO ACEVEDO DUARTE
Universidad Industrial de Santander**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2008

*A Dios, por darme la fortaleza y sabiduría necesarias para superar los
obstáculos que se presentan día a día.*

*A mis padres, por ser las personas que siempre han confiado en mí, me han
guiado con sus consejos y me han motivado a seguir adelante y luchar por
mis sueños.*

*A mi tía Nancy y mi tío Henry, por preocuparse por el bienestar de mi
familia y tratarme como una hija.*

Alba Lucía

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. M. Sam Mannan y al Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Texas A&M por haberme dado la oportunidad de pertenecer al Mary Kay O'Connor Process Safety Center, en el cual tuve la oportunidad de desarrollar este proyecto y además conocer personas de 14 países diferentes, quienes me brindaron su hospitalidad y me enriquecieron con sus culturas.

Al Dr. Hans Pasman por su inmensa colaboración.

Al Dr. Leonardo Acevedo, quien muy amablemente accedió a ser el Lector de mi tesis.

A mis profesores, por ser parte de mi proceso de aprendizaje y haber dado lo mejor de ellos en mi formación como Ingeniera Química.

Gracias a mis amigos, por haberme brindado su amistad, apoyo, motivación y colaboración durante la carrera y por haber compartido tantos momentos inolvidables. Gracias, porque sé que aunque este ciclo está a punto de cerrarse ellos seguirán haciendo parte de mi vida.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1 PROCESOS INHERENTEMENTE MÁS SEGUROS	3
1.2 ALQUILACIÓN	3
1.2.1 Comparación de los procesos de alquilación con HF y H ₂ SO ₄	4
1.2.2 Descripción del Proceso de Alquilación.	5
1.2.3 Peligros de los procesos de alquilación	7
2. METODOLOGÍA	8
2.1 IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS	9
2.2 CÁLCULO DEL INDICE DE SEGURIDAD INHERENTE	9
2.3 CÁLCULO DEL PUNTAJE DE RIESGOS	11
2.3.1 Desarrollo del escenario	11
2.3.2 Estimación de la severidad de las consecuencias	12
2.3.3 Asignación de puntajes a salvaguardas, causas y consecuencias	13
2.4 ESTIMACIÓN DE COSTOS DE CADA ALTERNATIVA	13
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	14
3.1 CÁLCULO DEL INDICE DE SEGURIDAD INHERENTE (ISI)	14
3.1.1 Cálculo del ISI para el proceso completo	14
3.1.2 Cálculo del ISI para el sedimentador	16
3.1.3 Comparación de subíndices de inventario y toxicidad	17
3.2 CÁLCULO DEL PUNTAJE DE RIESGOS	18
3.2.1 Desarrollo de los escenarios	18
3.2.2 Estimación de la severidad de las consecuencias	20
3.2.3 Asignación de puntajes a salvaguardas, causas y consecuencias	21
3.3 ESTIMACIÓN DE COSTOS DE CADA ALTERNATIVA	24

CONCLUSIONES	26
RECOMENDACIONES	27
BIBLIOGRAFÍA	28
ANEXOS	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tecnologías disponibles para el proceso de Alquilación	4
Figura 2. Metodología utilizada en el desarrollo del proyecto para cada una de las alternativas	8
Figura 3. Índice de Exposición a Químicos en función del diámetro del agujero	20
Figura 4. Distancias peligrosas en función del diámetro del agujero	21
Figura 5. Distancias peligrosas en función del flujo másico de una gotera	21

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de las ventajas y desventajas de la alquilación con HF y con H ₂ SO ₄	5
Tabla 2. Subíndices del Índice de Seguridad Inherente	10
Tabla 3. ISI para los procesos completos.	15
Tabla 4. ISI para sedimentador	17
Tabla 5. Comparación de los subíndices de toxicidad e inventario de cada ácido.	18
Tabla 6. APP para el sedimentador de ácido en la alquilación con H ₂ SO ₄ .	19
Tabla 7. APP para el sedimentador de ácido en la alquilación con HF.	19
Tabla 8. Asignación de puntajes para los escenarios del sedimentador de H ₂ SO ₄	22
Tabla 9. Asignación de puntajes para los escenarios del sedimentador de HF	23
Tabla 10. Costos capitales y de producción para las unidades de alquilación	24

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. Descripción del proceso del alquilación con H_2SO_4	31
ANEXO 2. Descripción del proceso del alquilación con HF	34
ANEXO 3. Propiedades físicas y tóxicas de cada ácido y las consecuencias que conlleva el contacto con ellos	37
ANEXO 4. Pasos para calcular el índice de seguridad inherente	40
ANEXO 5. Sistema de puntaje de riesgos	46
ANEXO 6. Metodología para calcular el Índice de Exposición a químicos de Dow	50

RESUMEN

TITULO: SEGURIDAD INHERENTE CON RESPECTO AL PELIGRO DE LIBERACIÓN TÓXICA: COMPARACIÓN DE DOS ALTERNATIVAS PARA EL PROCESO DE ALQUILACIÓN¹

AUTOR: Alba Lucía Pineda Solano **

PALABRAS CLAVES: Peligro de liberación tóxica, alquilación, seguridad inherente, índice de seguridad inherente, puntaje de riesgos.

DESCRIPCIÓN: Las múltiples tragedias ocurridas en plantas químicas han llevado a la búsqueda de procesos inherentemente más seguros, es decir, aquellos en los que se logra reducir o eliminar peligros mediante características que son permanentes e inseparables del proceso en lugar de controlarlos. Uno de los procesos para los que ha sido complicado establecer la tecnología inherentemente más segura es el proceso de alquilación, en el cual se utilizan como catalizadores comercialmente ácido sulfúrico (H₂SO₄) y ácido fluorhídrico (HF). Cada uno de ellos proporciona diferentes ventajas y desventajas en cuanto a seguridad y costos que dificultan discernir entre las dos tecnologías.

Este trabajo se desarrolló con el fin de evaluar criterios que permitan discernir cuál es la mejor tecnología para el proceso de alquilación desde el punto de vista de su seguridad. Para esto, se llevaron a cabo dos metodologías diferentes para cuantificar la seguridad inherente con respecto al peligro de una liberación tóxica. Inicialmente, se calculó el índice de seguridad inherente (ISI) y para dar mayor confiabilidad a los resultados se implementó la metodología del puntaje de riesgos. Adicionalmente, se estimaron los costos de las dos alternativas con el fin de saber si la alternativa inherentemente más segura es también la más económica, ya que los costos son un criterio determinante para decidir entre las diferentes alternativas de un proceso.

Se encontraron falencias en cada una de las metodologías, por lo cual, no se consideraron criterio suficiente para discernir entre las dos tecnologías. Con base en lo anterior, se hicieron recomendaciones que permitan en un futuro determinar la tecnología que proporcione el mejor balance de seguridad inherente global.

¹ Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: PhD. M. Sam Mannan; Texas A&M University. Lector: PhD. Leonardo Acevedo Duarte; Universidad Industrial de Santander.

ABSTRACT

TITLE: INHERENT SAFETY WITH REGARD TO THE TOXIC RELEASE HAZARD: COMPARISON OF TWO ALTERNATIVES FOR THE ALKYLATION PROCESS*

AUTOR: Alba Lucía Pineda Solano**

PALABRAS CLAVES: Toxic release hazard, alkylation, inherent safety, inherent safety index, risk scoring.

DESCRIPTION: The many tragedies that have occurred in chemical plants have led to the development of inherently safer processes which reduce or eliminate the hazards by characteristics that are permanent and inseparable parts of the process instead of controlling them. The alkylation process is one of the processes that has been difficult to decipher what its inherently safer alternative is. Two catalysts are commercially used in this process: sulfuric acid (H_2SO_4) and hydrofluoric acid (HF). Each one of them offers different advantages and disadvantages regarding safety and costs that have made it difficult to decide among the two technologies.

This work was developed to evaluate criteria in order to help decide which is the best alternative for the alkylation process with regard to safety. Two different methodologies were implemented in order to quantify the inherent safety with respect to the toxic release hazard. First, the inherent safety index (ISI) was calculated and then a risk scoring methodology was implemented to make the results more reliable. Additionally, because finances is a determining criterion when deciding among the different alternatives of a process, the costs of each technology were estimated in order to conclude whether or not the inherently safer alternative is also the most financially viable one.

Some weaknesses were found with each methodology and, for that reason, they were not considered to be enough criteria to decide among the technologies. Based on the results, recommendations were made in order to implement a methodology that determines the technology that offers the best overall inherent safety balance.

* Degree Work

** Physical-Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering Department. Advisor: PhD. M. Sam Mannan; Texas A&M University. Text Reader: PhD. Leonardo Acevedo Duarte; Universidad Industrial de Santander.

INTRODUCCIÓN

En el diseño de plantas es de gran importancia el control de los peligros asociados al proceso. En la típica propuesta para la prevención de desastres las medidas de seguridad se toman cerca del final del diseño del proceso, dejando como únicas opciones disponibles sistemas de control que pueden fallar en cualquier momento y requieren mantenimiento frecuente [1].

Después de tragedias ocurridas en plantas químicas como la de Flixborough, (Inglaterra) en 1974 y la de Bhopal, (India) en 1984 [2], se desarrolló el concepto de los diseños inherentemente más seguros, es decir, aquellos en los que se logra reducir o eliminar peligros mediante características que son permanentes e inseparables del proceso [3].

Un caso que ha ameritado el estudio de su seguridad es el proceso de alquilación, sobre el cual ha sido complicado definir la tecnología inherentemente más segura. Este proceso consiste en llevar a cabo la reacción entre el isobutano y olefinas livianas en presencia de un catalizador ácido fuerte para producir una mezcla de parafinas de alto octanaje llamado alquilato, el cual es un excelente componente para mezclar con la gasolina [4].

Comercialmente, los catalizadores más usados son el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y el ácido fluorhídrico (HF). Ambos ácidos son tóxicos y cada uno de ellos ofrece diferentes ventajas y desventajas en cuanto a seguridad y costos que dificultan decidir cual de los dos ácidos usar. Por un lado, el HF tiene un punto de ebullición bajo y si es liberado en ciertas condiciones forma un aerosol estable que es arrastrado por el viento poniendo en riesgo la seguridad del público y del ambiente [5]. Por otro lado, el H_2SO_4 tiene un punto de ebullición alto y en caso de un derrame permanecerá líquido, lo cual lo hace más fácil de contener. Su mayor desventaja es que se necesita una cantidad 140 veces mayor que la de HF, aumentando los peligros ambientales y riesgos de transporte [6]. Esto ha creado

una controversia acerca de cuál alternativa es inherentemente más segura y aunque se han desarrollado herramientas que facilitan el diseño de procesos inherentemente más seguros y la toma de decisiones, éstas no han sido utilizadas ampliamente como otras herramientas de evaluación de riesgos.

Éste proyecto se desarrolló con el fin de evaluar criterios que permitan discernir cuál es la mejor tecnología para el proceso de alquilación desde el punto de vista de su seguridad. Para esto, se llevaron a cabo dos metodologías diferentes para cuantificar la seguridad inherente con respecto al peligro de una liberación tóxica. Inicialmente, se calculó el índice de seguridad inherente (ISI) [3]. Este es una herramienta que toma en cuenta los aspectos químicos (ISI químico) y de ingeniería (ISI del proceso) de la seguridad inherente, los cuales están representados por subíndices que conforman el ISI total.

Para dar mayor confiabilidad a los resultados se aplicó la metodología del puntaje de riesgos [7]. Esta es una evaluación de riesgos simplificada por medio de la cual se asignan puntajes a las causas, consecuencias y salvaguardas de diferentes escenarios, para obtener un puntaje de riesgo total mediante el cual pueden ser comparados. Tanto el índice de seguridad inherente como el puntaje de riesgos no han sido calculados anteriormente para el proceso de alquilación.

Debido a que los costos son un factor determinante para decidir entre las diferentes alternativas de un proceso, se estimaron los costos de cada alternativa del proceso de alquilación con el fin de saber si la alternativa inherentemente más segura es también la más económica.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 PROCESOS INHERENTEMENTE MÁS SEGUROS

Una planta inherentemente más segura depende de la química y la física para prevenir accidentes en lugar del uso de los sistemas de control redundantes y procedimientos de operación especiales [1]. Las propuestas para el diseño de plantas y procesos inherentemente más seguros se han agrupado en cuatro estrategias principales:

Minimización: Usar pequeñas cantidades de sustancias peligrosas en las diferentes operaciones y equipos del proceso [2,8].

Sustitución: Reemplazar un material por una sustancia menos peligrosa o usar una química alternativa [8].

Moderación: Usar condiciones menos severas que minimicen el impacto de una liberación de una sustancia peligrosa o energía [8].

Simplificación: Diseñar las instalaciones de manera que se elimine la complejidad innecesaria [8].

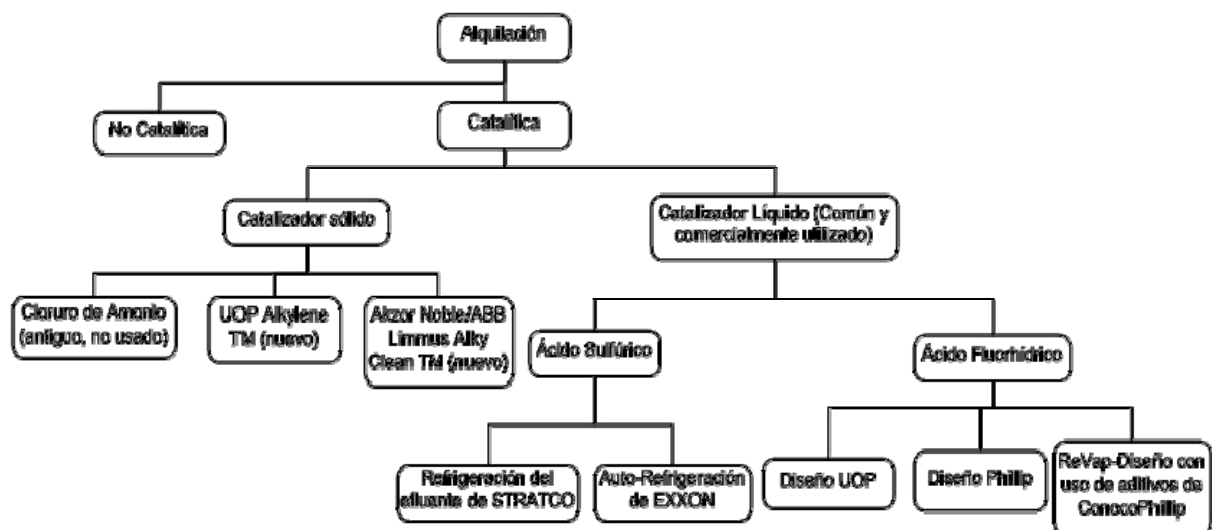
1.2 ALQUILACIÓN

La alquilación es el proceso mediante el cual, se lleva a cabo una reacción exotérmica en la que olefinas livianas como propileno, butilenos y pentenos reaccionan con isobutano en presencia de un catalizador ácido fuerte para producir el alquilato. Éste último es una mezcla compleja de alcanos ramificados del rango de ebullición de la gasolina, baja presión de vapor Reid (RVP), alto octanaje, y libre

de alquenos, aromáticos y sulfuros. Estas cualidades hacen del alquilato un producto excelente para mezclar con la gasolina [4,9].

Comercialmente, los catalizadores más usados en el proceso de alquilación son el ácido fluorhídrico (HF) y el ácido sulfúrico (H₂SO₄). Ambos catalizadores son tóxicos y por tanto peligrosos tanto para el personal de la planta como para las comunidades alrededor [10]. Han sido desarrolladas nuevas tecnologías que usan catalizadores sólidos pero su inaceptable desactivación rápida sigue siendo un obstáculo para la comercialización [4]. Los diferentes procesos de alquilación disponibles en las refinerías se muestran en la Figura 1.

Figura 1. Tecnologías disponibles para el proceso de Alquilación [9].



1.2.1 Comparación de los procesos de alquilación con HF y H₂SO₄. En la Tabla 1 se resumen las ventajas y desventajas de la alquilación con HF y H₂SO₄.

Tabla 1. Comparación de las ventajas y desventajas de la alquilación con HF y con H₂SO₄ [11].

Alquilación con HF	Alquilación con H₂SO₄
El catalizador puede ser regenerado por destilación.	El catalizador se regenera en una planta por separado que queda generalmente por fuera de la refinería.
La reacción se puede llevar a cabo a temperaturas de 30-45°C y se usa agua como medio de enfriamiento.	La zona de reacción debe ser refrigerada hasta aprox. 10°C para evitar reacciones secundarias.
Requerimientos de destilación complicados. Cantidades significativas de HF van en el efluente del reactor.	Requerimientos de destilación más simples debido a que el efluente del reactor está libre de catalizador cuando se alimenta a la sección de destilación.
La solubilidad del HF en isobutano es más alta, por tanto requiere menos agitación en la zona de reacción.	H ₂ SO ₄ e isobutano son inmiscibles, por tanto requiere un grado de agitación alto.
Consumo de HF = 0.15 lb/barril de alquilato	Consumo de H ₂ SO ₄ = 21-25 lb/barril de alquilato.
HF es altamente tóxico y se encuentra en fase vapor a T ambiente.	H ₂ SO ₄ es también tóxico pero existe como líquido a P atmosférica, lo cual lo hace más fácil de manejar de un modo seguro.
Requiere secado riguroso del alimento y metalurgia especial.	No requiere secado del alimento y requiere una cantidad limitada de metalurgia especial.

1.2.2 Descripción del proceso de alquilación. Existen varios procesos de alquilación con H₂SO₄ y con HF comercialmente disponibles. En este capítulo se describe brevemente el proceso de alquilación con H₂SO₄ utilizando el diseño de Refrigeración del efluente de STRATCO [11] con regeneración de ácido por fuera de la planta, y el proceso de alquilación con HF utilizando el diseño de Phillip Petroleum [11]. En los Anexos 1 y 2 se muestran diagramas de flujo simplificados de los procesos de alquilación con H₂SO₄ y con HF así como también una descripción más detallada de los procesos.

Alquilación con ácido sulfúrico. Los hidrocarburos y el ácido entran al reactor y forman una emulsión. Una porción de ésta fluye a un sedimentador donde la fase de hidrocarburos es separada de la fase ácida. El ácido que sale del sedimentador se devuelve al reactor junto con una pequeña corriente de ácido fresco que continuamente reemplaza una cantidad equivalente de ácido gastado extraído [11]. La fase liviana es parcialmente vaporizada por expansión, con lo cual se reduce su temperatura y pasa a través de los tubos del reactor removiendo el calor de reacción mientras se vaporiza. Los gases son enviados a un compresor y el propano es eliminado en una columna depropanizadora. La corriente líquida remanente contiene en su mayoría isobutano, alquilato y pequeñas cantidades de sulfatos solubles en hidrocarburos que se deben remover. Después de que han sido removidos los sulfatos, la corriente es alimentada a una columna deisobutanizadora y posteriormente a una debutanizadora para alcanzar la calidad de n-butano deseada como destilado y el alquilato como producto de fondos [11].

Alquilación con ácido fluorhídrico. Los hidrocarburos previamente secos entran al reactor y forman una emulsión con el HF. La mezcla de reacción que sale del reactor entra a un sedimentador donde la fase de hidrocarburos es separada de la fase ácida. El ácido que sale continuamente del sedimentador es enfriado en uno o más intercambiadores de calor y luego reciclado. La fase de hidrocarburos que sale del sedimentador contiene en su mayoría isobutano y alquilato con pequeñas cantidades de propano, n-butano disuelto en HF y fluoruros de alquilo [11]. Esta mezcla se separa en cuatro corrientes en la torre de fraccionamiento principal o isostripper: una mezcla de HF y propano en el tope, una corriente lateral rica en isobutano, otra corriente lateral rica en n-butano y el alquilato como fondos [10].

El destilado del isostripper se envía a una depropanizadora y el destilado de ésta se envía a un despojador de HF. Las corrientes de propano y n-butano deben ser procesadas para remover HF y fluoruros de alquilo.

Para remover rastros de HF o fluoruros y posibles polímeros conjuntos del alquilato se utiliza un tratamiento con KOH [10].

1.2.3 Peligros de los procesos de alquilación: Uno de los principales peligros del proceso de alquilación es la gran cantidad de GLP presente en la unidad, lo cual conduce a riesgos de incendios y explosiones potenciales [12]. Los dos tipos de unidades de alquilación tienen riesgos similares en este aspecto ya que ambas manejan cantidades similares de hidrocarburos dentro de la unidad y además, ninguno de los dos ácidos afecta la inflamabilidad del GLP [11,12].

Los dos ácidos son corrosivos, y aún más cuando son diluidos con agua o se eleva su temperatura. En las plantas con HF se usa Monel en ciertas secciones y Alloy 20 en plantas con H₂SO₄. Este último reacciona violentamente con agua y los dos ácidos reaccionan exotérmicamente con álcalis [13].

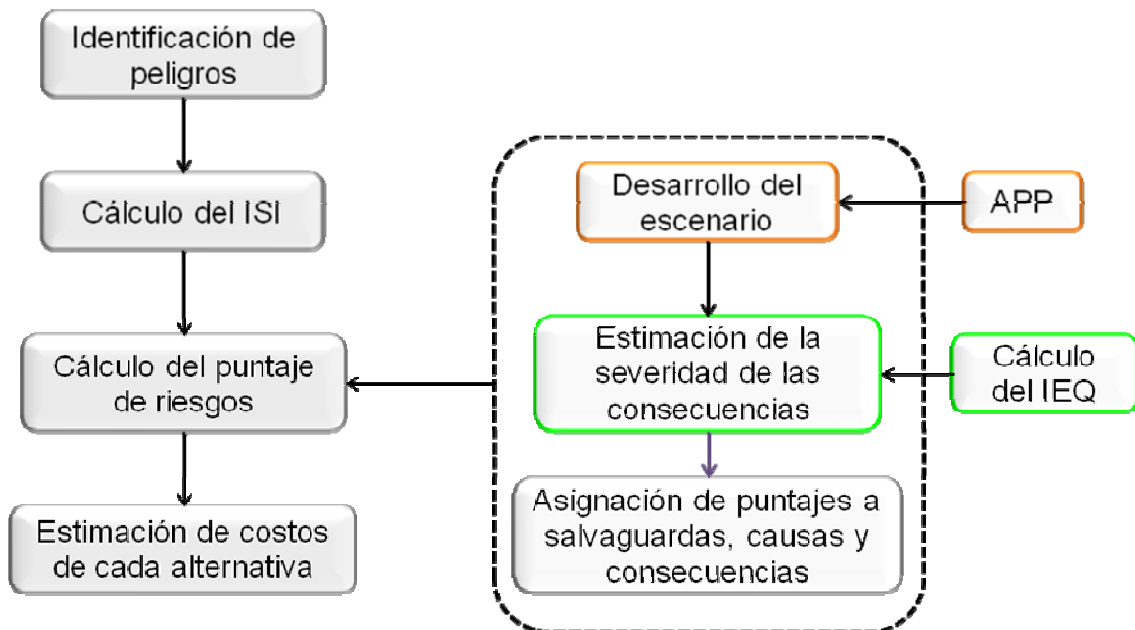
Tanto el HF como el H₂SO₄ son sustancias peligrosas; sin embargo, el HF es considerablemente más peligroso, ya que se vaporiza rápidamente después de una fuga como líquido, poniendo en riesgo al personal y la comunidad alrededor de la planta. En el Anexo 3 se muestran las propiedades físicas y tóxicas de cada ácido y las consecuencias a las que conlleva el contacto con estos.

La ventaja del H₂SO₄ es que permanece en estado líquido, por tanto en caso de una fuga o derrame y los peligros generalmente se limitan a los alrededores inmediatos [10]. Su mayor desventaja es que el consumo en el proceso es aproximadamente 140 veces más que el de HF, produciendo 280 veces más residuos que en el caso del HF y aumentando los riesgos de transporte, almacenamiento y los peligros ambientales [6]. Por esta razón, se ha creado una controversia acerca de cuál ácido proporciona un proceso inherentemente más seguro. El presente estudio se enfoca hacia la evaluación de un peligro muy particular: una potencial liberación tóxica de ácido.

2. METODOLOGIA

Se llevaron a cabo dos metodologías diferentes para cuantificar la seguridad inherente con respecto al peligro de una liberación tóxica de los procesos y obtener criterios de decisión para discernir cuál alternativa del proceso de alquiler es inherentemente más segura: inicialmente, se calculó el Índice de Seguridad Inherente (ISI) y la metodología del cálculo de puntajes de riesgos adaptada del trabajo de Leverenz y Aysa [7]. Adicionalmente, se estimaron los costos de las dos alternativas con el fin de saber si la alternativa inherentemente más segura es también la más económica, ya que los costos son un criterio determinante para decidir entre las diferentes alternativas de un proceso. En la Figura 2 se sintetiza la metodología utilizada en el desarrollo del estudio.

Figura 2. Metodología utilizada en el desarrollo del proyecto para cada una de las alternativas.



2.1 IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

Mediante una revisión de literatura extensa se identificaron los peligros proporcionados por las unidades de alquilación y por los ácidos HF y H₂SO₄ como tal. Los peligros identificados fueron descritos en el capítulo 1.

2.2 CÁLCULO DEL INDICE DE SEGURIDAD INHERENTE (ISI)

El ISI involucra aspectos químicos y de ingeniería de la seguridad inherente. El ISI Total es la suma del Índice de Seguridad Inherente Químico (ISIQ) y el Índice de Seguridad Inherente del Proceso (ISIP) [3].

$$ISI = ISIQ + ISIP \quad (1)$$

El ISIQ es la suma de subíndices de inflamabilidad (I_{FL}), reactividad (I_{RM} y I_{RS}), explosividad (I_{EX}), toxicidad (I_{TOX}) y corrosividad (I_{COR}) de las sustancias químicas presentes en el proceso [3].

$$ISIQ = I_{RM_{m\acute{a}x}} + I_{RS_{m\acute{a}x}} + I_{INT_{m\acute{a}x}} + (I_{EX} + I_{FL} + I_{TOX})_{m\acute{a}x} + I_{COR_{m\acute{a}x}} \quad (2)$$

El ISIP es la suma de subíndices para inventario (I_i), temperatura (I_T) y presión (I_P) del proceso, seguridad del equipo (I_{EQ}) y estructura segura del proceso (I_{ST}) [3].

$$ISIP = I_i + I_{T_{m\acute{a}x}} + I_{P_{m\acute{a}x}} + I_{EQ_{m\acute{a}x}} + I_{ST_{m\acute{a}x}} \quad (3)$$

Los índices son calculados para cada alternativa por separado y se comparan los resultados. En la Tabla 2 se muestran los subíndices y el rango de puntajes asignado. En el Anexo 4 se muestra la metodología para asignar los puntajes a cada subíndice.

Los cálculos del ISI se hacen con base en la peor situación. Un índice bajo representa un proceso inherentemente más seguro [3].

Tabla 2. Subíndices del Índice de Seguridad Inherente [3].

INDICE DE SEGURIDAD INHERENTE QUÍMICO (ISIQ)	PUNTAJE
Calor de la reacción principal (I_{RM})	0 – 4
Calor de la reacción secundaria (I_{RS})	0 – 4
Interacción Química (I_{INT})	0 – 4
Explosividad (I_{EX})	0 – 4
Corrosividad (I_{COR})	0 – 2
Inflamabilidad (I_{FL})	0 – 4
Toxicidad (I_{TOR})	0 – 6
INDICE DE SEGURIDAD INHERENTE DEL PROCESO (ISIP)	
PUNTAJE	
Inventario (I_I)	0 – 5
Temperatura del Proceso (I_T)	0 – 4
Presión del Proceso (I_P)	0 – 4
Equipo (I_{EQ})	0 – 4
Estructura del Proceso (I_{ST})	0 – 5

Cabe anotar que para determinar si una alternativa es inherentemente más segura con respecto a todos los peligros, es necesario analizar todos los diferentes escenarios que se puedan presentar y sus posibles consecuencias, no solo dentro de la planta sino fuera de ella (como el caso del transporte de sustancias químicas). Los riesgos asociados a los peligros dependen en gran medida de las características específicas de la planta y su lugar de ubicación.

La mayoría de las veces, como en el caso del proceso de alquilación, las alternativas que reducen o eliminan un peligro por un lado, crean o aumentan otro peligro. La alternativa inherentemente más segura debe ser aquella que ofrezca el mejor balance de seguridad inherente global.

El estudio realizado se basó en los procesos de alquilación con HF y con H₂SO₄ presentados en el SRI handbook [11]. En este último se da una descripción de los procesos de alquilación, química de las reacciones, equipos y variables involucradas en el proceso de alquilación y además se proporcionan datos de costos y balance de masa para una producción de 10000 barriles/día de alquilato a partir de corrientes de alimentación de butenos e isobutano. Pero no se hace comparación alguna con el fin de decidir cuál es la mejor alternativa.

El ISI fue calculado inicialmente para el proceso completo y para mayor claridad en los resultados se calculó el ISI para el sedimentador por ser el equipo que maneja la mayor cantidad de ácido dentro del límite de baterías. De la misma manera, se compararon los subíndices de toxicidad e inventario de cada ácido de forma individual.

2.3 CÁLCULO DEL PUNTAJE DE RIESGOS

Por medio de esta metodología se pueden dar puntajes de riesgo a diferentes escenarios en los que se deben identificar explícitamente las causas, consecuencias, y las salvaguardas que podrían reducir la probabilidad de dicho escenario [7].

El sistema de puntaje de riesgos está basado en una escala de orden de magnitud en la que los puntajes de las causas se asignan según su frecuencia, las consecuencias según su impacto y las salvaguardas de acuerdo a su confiabilidad [7]. En el Anexo 5 se encuentran los pasos seguidos por el autor para desarrollar el sistema de puntaje de riesgos.

Los puntajes de riesgos fueron calculados con y sin salvaguardas para tres posibles escenarios de liberación tóxica en el sedimentador de ácido con el fin de analizar cual alternativa era inherentemente más segura.

2.3.1 Desarrollo de los escenarios. Para el desarrollo de los escenarios se escogió la técnica de Análisis Preliminar de Peligros (APP) de acuerdo a la información disponible y la experiencia en técnicas de identificación de peligros, según las guías del CCPS (Center for Chemical Process Safety) [13].

La técnica de APP se puede llevar a cabo en instalaciones ya existentes para analizar de una forma preliminar los peligros que puedan llevar a potenciales accidentes. Para esto, se desarrolla una corta lista de causas que dan credibilidad a dicho accidente [14]. Mediante la técnica de APP se identificaron las causas, las posibles consecuencias y salvaguardas o sistemas de mitigación para cada escenario.

En éste análisis fueron utilizados las salvaguardas y sistemas de mitigación básicos, que deben estar presentes en cualquier planta de alquilación dependiendo si trabaja con HF o con H₂SO₄. Sin embargo, la evaluación de los escenarios desarrollados da una buena idea del peligro ofrecido por una liberación tóxica de ácido dentro del límite de baterías.

En la literatura se encuentra suficiente información acerca de las salvaguardas y sistemas de mitigación para la alquilación con HF [12, 15, 16]. Por el contrario, para la alquilación con H₂SO₄ se encuentra muy poca información, por lo que se asumieron salvaguardas que son comunes en la industria.

2.3.2 Estimación de la severidad de las consecuencias. Generalmente esta estimación es hecha por personas expertas en el tema.

Debido a que no se cuenta con un experto, se recurrió al Índice de Exposición a Químicos de Dow (Dow's CEI) [17]. Este es un método que permite calcular las distancias peligrosas cuando hay incidentes de liberación de químicos, lo cual da una idea de los peligros potenciales de salud para las comunidades alrededor de plantas químicas. En el Anexo 6 se muestra la metodología para calcular este índice.

Las distancias peligrosas se calcularon para diferentes tamaños de agujeros en el sedimentador y en el caso del goteo de las bridas se asumieron flujos máxicos entre 0,2 y 0,4 lb/min para los cálculos del IEQ. La información proporcionada por el IEQ fue complementada con datos históricos de incidentes que involucraron HF o H₂SO₄ en refinerías [6, 18, 19, 20].

2.3.3 Asignación de puntajes a salvaguardas, causas y consecuencias. Se asignaron los puntajes de acuerdo a las Tablas 1 a 3 del Anexo 4 y teniendo en cuenta los resultados arrojados por el Índice de Exposición a Químicos de Dow [17].

Para tener una idea de los puntajes que debían ser asignados a las causas y salvaguardas se recurrió a la literatura, en la que se reportan frecuencias de escenarios y confiabilidad de salvaguardas [2].

2.4 ESTIMACIÓN DE COSTOS DE CADA ALTERNATIVA

Debido a que el aspecto económico es un factor determinante a la hora de decidirse por una alternativa en particular, entonces se estimaron los costos de capital y de producción para los procesos de alquilación con HF y con H₂SO₄ como parte del análisis comparativo. Se llevaron al año 2007 los costos calculados en 1993 por el SRI handbook [11] para una planta de alquilación de 10000 barriles/día de alquilato que procesa una corriente de butenos (C₄) de la unidad de FCC (Fluid Catalytic Cracking). Para lo cual se utilizaron diferentes índices como: el Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI) para el costo total de la planta, y el índice de precios al productor, la tasa de inflación y el Employment Cost Index (ECI) para los costos de producción.

Los costos para la unidad de alquilación con H₂SO₄ se calcularon asumiendo que la regeneración del ácido es por fuera de la planta y para la unidad de alquilación con HF se calcularon costos con y sin el costoso sistema de mitigación para observar su impacto en los costos.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 CÁLCULO DEL INDICE DE SEGURIDAD INHERENTE (ISI)

3.1.1 Cálculo del ISI para el proceso completo. En la Tabla 3 se resumen los resultados obtenidos para los dos procesos de alquilación y a continuación se da breve explicación acerca de la asignación de puntajes:

- **Subíndice de calor de reacción para las reacciones primarias y secundarias:** Los calores de reacción de los dos procesos están alrededor de 1300-1400 J/g butenos. Por tanto, se asignó el mismo puntaje a los dos procesos.
- **Subíndice de Interacción Química:** Para la alquilación con H_2SO_4 la interacción química entre sustancias más peligrosa es la del ácido y el agua, los cuales reaccionan violentamente. En la alquilación con HF se encontró que el Al_2O_3 , el cual es usado como defluorizador, reacciona exotérmicamente con olefinas y puede conducir a una explosión [21]. Por esto, se asignó el mismo puntaje a los dos procesos.
- **Subíndice de inflamabilidad, explosividad y toxicidad:** La máxima suma obtenida para estos subíndices fue de 7 para los dos procesos. Este valor provino de varios hidrocarburos presentes en el proceso, tales como isobutano, butano e isopentano, los cuales aparte de ser altamente inflamables también son tóxicos.
- **Subíndice de corrosividad:** En los dos procesos se necesitan materiales más resistentes a la corrosión que el acero inoxidable en ciertas secciones del proceso que están expuestas a ácido diluido con agua. En la alquilación con H_2SO_4 se usa Alloy 20 y en la alquilación con HF se usa Monel. Por tanto, se asignó el mismo puntaje a los dos procesos.

Tabla 3. ISI para los procesos completos.

Índice de seguridad inherente químico (ISIQ)	Alquilación con H ₂ SO ₄	Alquilación con HF
Calor de la reacción principal (I_{RM})	3	3
Calor de la reacción secundaria (I_{RS})	3	3
Interacción Química (I_{INT})	4	4
$(I_{EX} + I_{FL} + I_{TOX})_{MÁX}$	7	7
Corrosividad (I_{COR})	2	2
Índice de seguridad inherente del proceso (ISIP)	Alquilación con H ₂ SO ₄	Alquilación con HF
Inventario (I_I)	5	5
Temperatura del Proceso (I_T)	2	2
Presión del Proceso (I_P)	2	2
Equipo (I_{EQ})		
ISBL	3	4
OSBL	3	3
Estructura del Proceso (I_{ST})	5	5
ISI TOTAL	39	40

- **Subíndice de Inventario:** En los dos procesos, la suma de los inventarios que se manejan en los equipos es mayor que el inventario al cual se le asigna el máximo puntaje según el ISI. Por ésta razón se le asignó el máximo puntaje a los dos procesos.
- **Subíndices de presión y temperatura:** Los dos procesos manejan temperaturas y presiones moderadas. La temperatura y presión más altas estuvieron dadas por el vapor a alta presión usado en el proceso. De nuevo, fue asignado el mismo puntaje a los dos procesos.
- **Subíndice de Seguridad del Equipo ISBL y OSBL:** En cuanto al subíndice del equipo ISBL, en la alquilación con H₂SO₄ el equipo con mayor grado de peligro es el compresor en la sección de refrigeración y en la alquilación con HF lo es el rehervidor del despojador de isobutano, dado que este es un calentador de

fuego directo. En ésta ocasión se asignó el mayor puntaje a la alquilación con HF.

En cuanto al subíndice del equipo OSBL, se asignó el mismo puntaje ya que en los dos procesos se cuenta con una tea.

- **Subíndice de Estructura Segura del Proceso:** Se encontraron incidentes mayores para los dos procesos [6, 19, 20, 21]; por tanto, nuevamente se asignó el mismo puntaje a los dos procesos.

En la Tabla 3 se observa que según el ISI, la alquilación con H_2SO_4 es inherentemente más segura. Sin embargo, el índice de los procesos difiere en un punto que proviene del subíndice de seguridad del equipo ISBL, puesto que en la alquilación con HF se usa un calentador de fuego directo como rehervidor del despojador de isobutano. Sin embargo, el hecho de que éste equipo esté presente en el proceso no influye de manera significativa a la hora de decidirse por alguna de las dos alternativas.

Se esperaba que el ISI mostrara una diferencia proveniente de alguno de los subíndices de inventario o toxicidad que ayudara a decidir cual de las dos alternativas es inherentemente más segura. Desafortunadamente, el ISI no muestra una diferencia pronunciada.

3.1.2 Cálculo del ISI para el sedimentador. En la Tabla 4 se resumen los resultados de los cálculos del ISI para el sedimentador.

El subíndice de interacción química no aplica en este caso debido a que todas las interacciones entre las sustancias presentes en el sedimentador aunque son reacciones secundarias, son esperadas. Al subíndice de estructura segura del proceso se asignó un puntaje de 2 porque no se encontraron accidentes reportados en la literatura que involucraran estos equipos.

Los resultados observados sugieren que la alquilación con HF es un poco inherentemente más segura.

Tabla 4. ISI para el sedimentador.

Índice de seguridad inherente químico (ISIQ)	Alquilación con H ₂ SO ₄	Alquilación con HF
Calor de la reacción principal (I_{RM})	N/A	N/A
Calor de la reacción secundaria (I_{RS})	3	3
Interacción Química (I_{INT})	N/A	N/A
$(I_{EX} + I_{FL} + I_{TOX})_{máx.}$	7	7
Corrosividad (I_{COR})	2	2
Índice de seguridad inherente del proceso (ISIP)	Alquilación con H ₂ SO ₄	Alquilación con HF
Inventario (I_I)	4	3
Temperatura del Proceso (I_T)	0	0
Presión del Proceso (I_P)	1	1
Equipo (I_{EQ}) ISBL	1	1
Estructura del Proceso (I_{ST})	2	2
ISI TOTAL	20	19

Cabe resaltar que los rangos de los subíndices del ISI están definidos por límites discretos, lo cual produce dos efectos significativos: excesiva sensibilidad en regiones cerca de los límites del rango y sensibilidad insuficiente dentro del rango. Lo anterior se refleja en el subíndice de inventario del sedimentador de HF, donde asignó un puntaje de 3 a pesar de que maneja un inventario de 194 t. Este mismo puntaje hubiese sido asignado si el inventario fuese de 50 t ó 100 t, con lo que se muestra que la metodología es incapaz de tener en cuenta el volumen de producción. Además, 194 t está cerca del límite inferior del siguiente rango (200 t) para el cual el puntaje sería de 4 y se hubiesen tenido índices de seguridad inherente iguales para las dos tecnologías.

3.1.3 Comparación de subíndices de inventario y toxicidad. La Tabla 5 muestra la comparación de los subíndices de los ácidos.

Los resultados de la Tabla 5 muestran una clara diferencia a favor de la alquilación con HF. La comparación del subíndice de toxicidad sugiere que el H₂SO₄ es más tóxico que el HF, lo cual es cierto si se comparan los valores TLV y los ERPG (Ver Anexo 3). Sin embargo, el subíndice no tiene en cuenta la facilidad con la que se pueden alcanzar estos límites de toxicidad. Por las propiedades físicas del HF, es mucho más fácil alcanzar concentraciones tóxicas que son arrastradas por el aire poniendo en peligro la vida de empleados y comunidades alrededor.

Tabla 5. Comparación de los subíndices de toxicidad e inventario para cada ácido.

Subíndice	Alquilación con H ₂ SO ₄	Alquilación con HF
Toxicidad (I_{TOX})	5	4
Inventario (I_I)	3	1
TOTAL	8	4

Con base en los resultados obtenidos, es bastante difícil afirmar cual de los dos procesos es inherentemente más seguro.

Los problemas presentados en los resultados obtenidos con el índice explican por qué algunas de las herramientas desarrolladas para cuantificar la seguridad inherente y facilitar la decisión entre diferentes opciones no son ampliamente usadas. La industria no confía en este tipo de índices debido a que son muy generalizados y la seguridad inherente se debe evaluar para cada planta específicamente, ya que las condiciones cambian de un lugar a otro.

Con el fin de obtener más claridad en los resultados se recurrió a la metodología del puntaje de riesgos

3.2 CÁLCULO DEL PUNTAJE DE RIESGOS

3.2.1 Desarrollo de los escenarios. Los resultados del APP para los sedimentadores de H₂SO₄ y HF se muestran en las Tablas 6 y 7.

Tabla 6. APP para escenarios de liberación tóxica de H₂SO₄ en el sedimentador.

Esc. N°	Causa	Consecuencia	Salvaguardas/Mitigación
1	Goteo de una brida en la línea de H ₂ SO ₄	Pequeña fuga de H ₂ SO ₄ en el sitio.	<ul style="list-style-type: none"> • Indicador de flujo
2	Ruptura de la línea de H ₂ SO ₄ del sedimentador hacia el reactor.	Liberación de gran cantidad de H ₂ SO ₄ . Impacto en el sitio.	<ul style="list-style-type: none"> • Válvulas de aislamiento • Plan de respuesta a emergencias • Diques y sistema de drenaje
3	Agujero en el fondo del sedimentador	Liberación de gran cantidad de H ₂ SO ₄ con pequeña cantidad de hidrocarburos disueltos. Probablemente tenga sólo impacto en el sitio.	<ul style="list-style-type: none"> • Diques y sistema de drenaje • Plan de respuesta a emergencias • Indicador de nivel

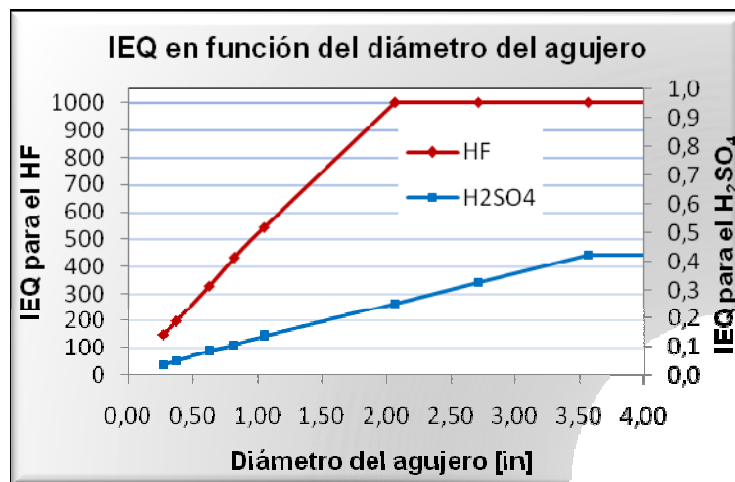
Tabla 7. APP para escenarios de liberación tóxica de HF en el sedimentador.

Esc. N°	Causa	Consecuencia	Salvaguardas/Mitigación
1	Goteo de una brida en la línea del HF	Pequeña fuga de HF, impacto en el sitio.	<ul style="list-style-type: none"> • Pintura para detección de fugas en válvulas y bridas. • Indicador de flujo
2	Ruptura de la línea de HF que va del sedimentador al reactor.	Liberación de gran cantidad de HF, heridos y posibles fatalidades en el sitio, potencial impacto fuera de la planta.	<ul style="list-style-type: none"> • Válvulas de aislamiento • Circuito cerrado de TV. • Plan de respuesta a emergencia • Diques y sistema de drenaje • Cortinas de agua
3	Agujero en el fondo del sedimentador	Liberación de gran cantidad de HF con pequeña cantidad de hidrocarburos disueltos. Heridos y posibles fatalidades en el sitio. Potencial impacto fuera de la planta.	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de Vaciado • Diques y sistema de drenaje • Cortinas de agua • Plan de respuesta a emergencia • Circuito cerrado de TV. • Indicador de nivel.

3.2.2 Estimación de la severidad de las consecuencias. En las Figuras 3 y 4 se observa que después de cierto diámetro de agujero, los IEQ y las distancias peligrosas se vuelven constantes. Esto se debe a que el IEQ asume una liberación que dura 15 minutos antes de que sea detenida de alguna forma, y para tamaños muy grandes de agujero, todo el contenido de ácido en el sedimentador sería liberado en este tiempo o en un tiempo menor.

Los resultados obtenidos eran de esperarse debido a las propiedades físicas de cada ácido. Si todo el H_2SO_4 presente en el sedimentador (186381,8 lb) fuese liberado, la distancia peligrosa sería de unos pocos metros, y solo afectaría los empleados de la sección. Pero en el caso del HF, incluso una pequeña fuga desde una brida proveería una distancia peligrosa de hasta 100 m, poniendo en peligro no solo a los empleados sino a la comunidad alrededor. (Ver Figura 5)

Figura 3. Índice de Exposición a Químicos en función del diámetro del agujero.



Según incidentes ocurridos con HF, se han registrado fatalidades solamente dentro del área de la planta, y gran cantidad de hospitalizaciones por fuera de ella a grandes distancias [22]. En incidentes con ácido sulfúrico no se han reportado fatalidades debidas al ácido como tal.

Figura 4. Distancias peligrosas en función del diámetro del agujero.

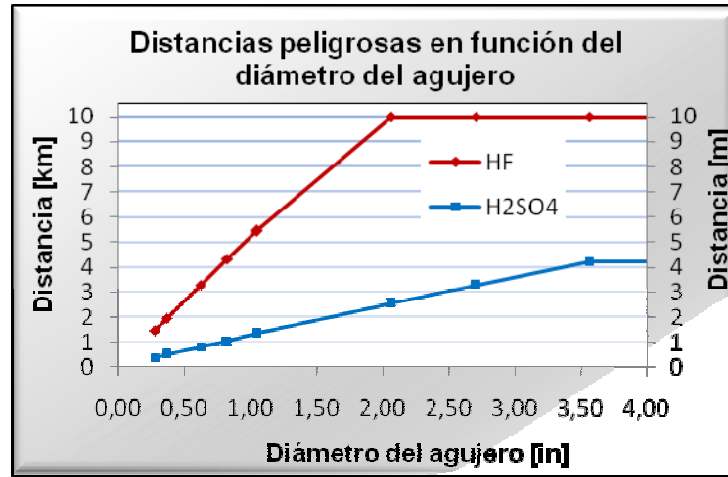
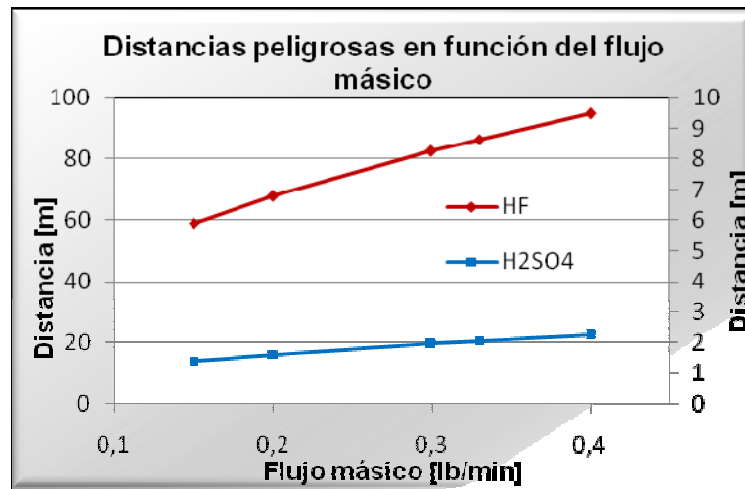


Figura 5. Distancias peligrosas en función del flujo másico de una gotera.



3.2.3 Asignación de puntajes a salvaguardas, causas y consecuencias. Los resultados se muestran a en las Tablas 8 y 9.

En cuanto a los puntajes de las causas, se asignó un puntaje de cero (0) al primer escenario debido a que es probable que ocurra ocasionalmente. Se asignó el mayor puntaje a la causa en del escenario 3 para las dos alternativas, pues según

la literatura [2], la probabilidad de que haya un agujero en un recipiente es mayor que la probabilidad que haya una ruptura total de una tubería.

A las consecuencias del escenario de liberación de H₂SO₄ se les asignó puntajes bajos basados en las distancias peligrosas calculadas con el IEQ.

Se consideró que las consecuencias de los escenarios 2 y 3 en el caso del HF se clasifican como de impacto “muy alto” según la tabla 3 del Anexo 4 y de acuerdo con el IEQ y los datos históricos de incidentes.

Tabla 8. Asignación de puntajes para los escenarios del sedimentador de H₂SO₄.

Esc. N°	Causa	Consec.	Salvaviduas/mitigación	Puntaje con salvaviduas	Puntaje sin salvaviduas	
1	0	0	Indicador de flujo	2	-2	0
2	-5	1	Válvulas de aislamiento	2	-10	-4
			Plan de respuesta a emergencias	1		
			Diques y sistema de drenaje	3		
3	-4	1	Indicador de nivel	2	-9	-3
			Plan de respuesta a emergencias	1		
			Diques y sistema de drenaje	3		
Puntaje de RiesgoTotal				-2,0	0,0	

Los puntajes calculados con salvaviduas indican que para el sedimentador de H₂SO₄ los puntajes de riesgo de los escenarios 1 y 3 son mayores que para el sedimentador de HF, lo que conlleva a un puntaje de riesgo total de un orden de magnitud mayor a pesar de presentar consecuencias de bajo impacto; esto se debe a la redundante cantidad de salvaviduas que debe tener una unidad de alquiler con HF y a que probablemente no se consideraron todas las salvaviduas en el caso del H₂SO₄. Sin embargo, los puntajes sin salvaviduas favorecen al H₂SO₄ en

dos órdenes de magnitud, lo cual sugiere que éste es inherentemente más seguro que el HF.

Tabla 9. Asignación de puntajes para los escenarios del sedimentador de HF.

Esc. N°	Causa	Consec.	Salvaguadas/mitigación	Puntaje con salvaguadas	Puntaje sin salvaguadas	
1	0	2	Pintura para detección de fugas en válvulas y bridas.	3	-3	2
			Indicador de flujo	2		
2	-5	5	Válvulas de aislamiento	2	-10	0
			Plan de respuesta a emergencias	1		
			Diques y sistema de drenaje	3		
			Circuito cerrado de tv	2		
			Cortinas de agua	2		
3	-4	5	Indicador de nivel.	2	-11	1
			Plan de respuesta a emergencia	1		
			Diques y sistema de drenaje	3		
			Sistema de vaciado	2		
			Cortinas de agua	2		
			Circuito cerrado de tv	2		
Puntaje de RiesgoTotal				-3,0	2,0	

Los cálculos de los puntajes de riesgo demuestran que, a pesar de que la alquilación con HF parece no ser el proceso inherentemente más seguro con respecto al peligro de una liberación tóxica, éste puede ser manejado con tal seguridad, que representa menores riesgos. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el peligro de la liberación de una nube de vapor aún está presente y una falla en el sistema de mitigación podría resultar en un accidente.

Cabe anotar que aunque la metodología utilizada es bastante simplificada y tiene cierto grado de subjetividad, ésta proporciona un criterio que inclina la decisión

hacia el ácido sulfúrico como la alternativa inherentemente más segura con respecto al peligro de liberación tóxica.

Como se mencionó anteriormente, decidir cuál de las alternativas del proceso de alquilación es inherentemente más segura depende en gran parte de las características específicas de cada planta y su lugar de ubicación. Por ésta razón, es necesario contemplar todas las posibles causas del escenario, no solo dentro de la planta sino fuera de ella (como en el caso del transporte y la regeneración por fuera de la planta, en la que se utilizan gases altamente tóxicos), ya que la selección de la tecnología debe representar el mejor balance de seguridad inherente global.

3.3 ESTIMACIÓN DE COSTOS DE CADA ALTERNATIVA

En la Tabla 10 se muestran los resultados de la estimación de costos. Se observa que la diferencia en los costos capitales entre la unidad de alquilación con H₂SO₄ y con HF incluyendo el costo del sistema de mitigación es pequeña y se podría decir que es despreciable debido al método de estimación.

Tabla 10. Costos capitales y de producción para las unidades de alquilación.

Costos	Alquilación con H ₂ SO ₄	Alquilación con HF	
		Sin mitigación	Con mitigación
Capitales (US \$1000)	126263	73560	128589
Producción (¢/lb de alquilato)	287,0	229,5	232,3

Por otro lado, se ve que el sistema de mitigación que se debe implementar en la alquilación con HF, para el cual se tomó un valor reportado en la literatura de US\$ 30 millones [23], tiene un gran impacto en el costo capital de la planta, pero éste sólo afecta los costos de producción en menos de 3 ¢/lb de alquilato.

Se observa también una marcada diferencia entre los costos de producción en la alquilación con H_2SO_4 y con HF. Esto se debe a que la energía suministrada a la zona de reacción con HF es menor que la suministrada a la de H_2SO_4 ya que ésta última hace uso de un impeler para proporcionar suficiente agitación a la mezcla. Además, la reacción de alquilación en el proceso con HF se lleva a cabo a 32°C , por lo que usa agua en los intercambiadores de calor como medio de enfriamiento, mientras que la reacción de alquilación con ácido sulfúrico se lleva a cabo a 10°C , por lo que requiere de un circuito de refrigeración que incluye un compresor.

Aunque los requerimientos energéticos del fraccionamiento en la alquilación con HF son mayores que con H_2SO_4 , el costo del combustible generalmente es menor que el costo de la electricidad.

En cuanto a los costos de los ácidos, el HF es mucho más caro pero se usa una cantidad menor y éste puede ser regenerado en el sitio. Todos los anteriores factores le dan la ventaja en costos de producción a la alquilación con HF.

En los resultados obtenidos se observa que la alquilación con ácido sulfúrico no es la más económica a pesar de ser la alternativa inherentemente más segura con respecto al peligro de una liberación tóxica, de acuerdo a la metodología del puntaje de riesgos. Los criterios de decisión llegan a resultados contradictorios, lo cual no permite discernir entre las dos alternativas.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos mediante el cálculo de los ISI no son criterio suficiente para discernir entre las dos alternativas debido a su falta de sensibilidad, por lo cual no se puede afirmar cual de los dos procesos es inherentemente más seguro mediante ésta metodología.

Según la metodología del puntaje de riesgos, la alquilación con ácido sulfúrico es inherentemente más segura con respecto al peligro de una liberación tóxica. La alquilación con HF sólo podría tener un puntaje de riesgo menor si cuenta con un número considerable de salvaguardas.

En el análisis de costos se encontró que la alternativa económicamente más atractiva es la alquilación con HF por tener costos de producción más bajos que la alquilación con H_2SO_4 , lo cual lleva a un criterio de decisión opuesto al del puntaje de riesgos.

Ninguna de las metodologías utilizadas permite tomar una decisión dado que llegan a resultados opuestos y además existen subjetividades en el puntaje de riesgos. Para tomar una decisión se requiere información más específica acerca de las plantas y aplicar metodologías más rigurosas.

RECOMENDACIONES

Usar una metodología más rigurosa como un Análisis de Riesgos Cuantitativo (QRA) complementado con economía para comparar las alternativas basándose en un análisis costo-beneficio.

Analizar otros escenarios que podrían representar riesgos para la alquilación con H_2SO_4 , como tanques de almacenamiento de ácido gastado, en los cuales se generan gases venenosos como SO_2 y H_2S , e instalaciones de carga y descarga de ácido.

Analizar los riesgos de una planta de regeneración de ácido sulfúrico debido a que ésta involucra gases muy tóxicos tales como SO_2 y SO_3 .

BIBLIOGRAFIA

1. Hendershot, D. C. (1997). "Inherently safer chemical process design." *Journal of Loss Prevention in the process industry* 10(3): 151-156.
2. Crowl, D. A. and J. F. Louvar (2002). *Chemical Process Safety. Fundamentals with Applications*. Upper Saddle River, NJ, USA, Prentice Hall.
3. Heikkilä, A.-M. (1999). *Inherent safety in Process Plant Design. An index-based approach*. Espoo, Finland, VTT Technical Research Centre of Finland.
4. Feller, A. and J. A. Lercher (2004). *Chemistry and Technology of Isobutane/Alkene Alkylation catalyzed by Liquid and solid acids*. *Advances in Catalysis Vol 48*. Garching, Alemania, Elsevier.
5. Purvis, M. and M. Herman (2005). *Needless Risk: Oil refineries and hazard reduction*, PennEnvironment Research & Policy Center.
6. Fthenakis, V. M. (1993). *A review of accidents, prevention and mitigation options related to hazardous gases*. Long Island, NY, USA, Brookhaven National Laboratory.
7. Leverenz, F. L. and J. Aysa (2006). *Cumulative Benefit Analysis for Ranking Risk Reduction Actions*. *Process Plant Safety Symposium*, Orlando, FL, USA.
8. Hendershot, D. C. and R. L. Post (2000). *Inherent safety and reliability in plant design*. *Mary Kay O'Connor Process Safety Center 2000 Annual Symposium*, Bristol, PA, Rohm and Haas Company. Engineering Division.

9. Mannan, M. S., A. S. Markowski, et al. Safety and Environmental Issues in the Alkylation Process based on USA Petroleum Industries Experiences. College Station, TX, USA, Mary Kay O'Connor Process Safety Center.
10. Albright, L. F. (1990). "H₂SO₄, HF processes compared, and new technologies revealed." Oil & Gas Journal: 71-77.
11. Chang, J. C. (1993). Alkylation for Motor Fuels: Supplement A. Process Economics Program. Menlo Park, CA, USA, SRI International.
12. STRATCO® Effluent Refrigerated H₂SO₄ Technology. Disponible online en: http://www2.dupont.com/Clean_Technologies/en_US/products/stratco/h2so4.html.
13. Scott, B. (1992). "Identify alkylation hazards" .Hydrocarbon Processing: 77-80.
14. Center for Chemical Process Safety (CCPS) (1992). Guidelines for Hazard Evaluation Procedures with worked examples. New York, NY, USA, AIChE.
15. Sheckler, J. C., L. J. Ross, et al. (1994). "New process additive reduces HF cloud-forming potential." Oil & Gas Journal 92(34): 60-63.
16. Nowak, F.-M., J. F. Himes, et al. (2003). Advances in Hydrofluoric (HF) acid catalyzed alkylation. NPRA Annual Meeting, San Antonio, TX, USA.
17. AIChE (1994). Dow's Chemical Exposure Index Guide. New York, NY, USA, American Institute of Chemical Engineers.
18. [Online]. http://www.csb.gov/index.cfm?folder=news_releases&page=news&NEWS_ID=45.

19. Westervelt, R. (1998). Sulfuric acid release at General. Chemical week.
20. _____ (1995). "Sulfuric acid leak at DuPont plant." Chemical Week 157(8): 5.
21. Hatayama, H. K., J. J. Chen, et al. (1980). A method for determining the compatibility of hazardous wastes. EPA-600/2-80-076. Cincinnati, OH, USA, United States Environmental Protection Agency, Center for Environmental Research Information.
22. Parkash, S. (2003). Refining Processes Handbook, Gulf Professional Publications.
23. _____ (1995). "Alkylation Safety major topic at Oil & Gas Journal seminar." Oil & Gas Journal Enero 16: 33-35.
24. Woodward, J. L. and H. Z. Woodward (1998). "Analysis of Hydrogen Fluoride release at Texas City." Process Safety Progress 17(3): 213-218.

ANEXO 1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DEL ALQUILACIÓN CON H₂SO₄

Reactor

El Contactor STRATCO es un recipiente horizontal que contiene un tubo de circulación interna, un haz de tubos para remover el calor de la reacción de alquilación y un impeler mezclador [11]. La sección de reacción opera a una presión de 50-70 psig para prevenir la vaporización. El alimento de hidrocarburos y ácido son introducidos al Contactor por el lado de succión del impeler dentro del tubo de circulación. Una emulsión hidrocarburo-ácido se forma cuando las corrientes pasan a través del impeler. La emulsión circula continuamente a alta velocidad alrededor del haz de tubos, donde se remueven el calor de la reacción de alquilación y la energía proporcionada por el impeler [11].

Una porción de la emulsión del Contactor es extraída y enviada al sedimentador de ácido. La fase ácida se devuelve al Contactor y los hidrocarburos pasan al circuito de refrigeración.

El hidrocarburo del sedimentador de ácido, a una temperatura aproximada de 10°C, pasa a través de una válvula de expansión mediante la cual se reduce la presión a 2-5 psig [11]. Como resultado, los compuestos más volátiles (propano e isobutano) se vaporizan y la temperatura del líquido cae a 0°C [11]. Ésta corriente de dos fases pasa a través del haz de tubos del Contactor donde se vaporiza otra cantidad de hidrocarburos a medida que se elimina el calor de reacción y después fluye hacia una trampa de succión en la que los vapores son separados del efluente neto del reactor.

Refrigeración

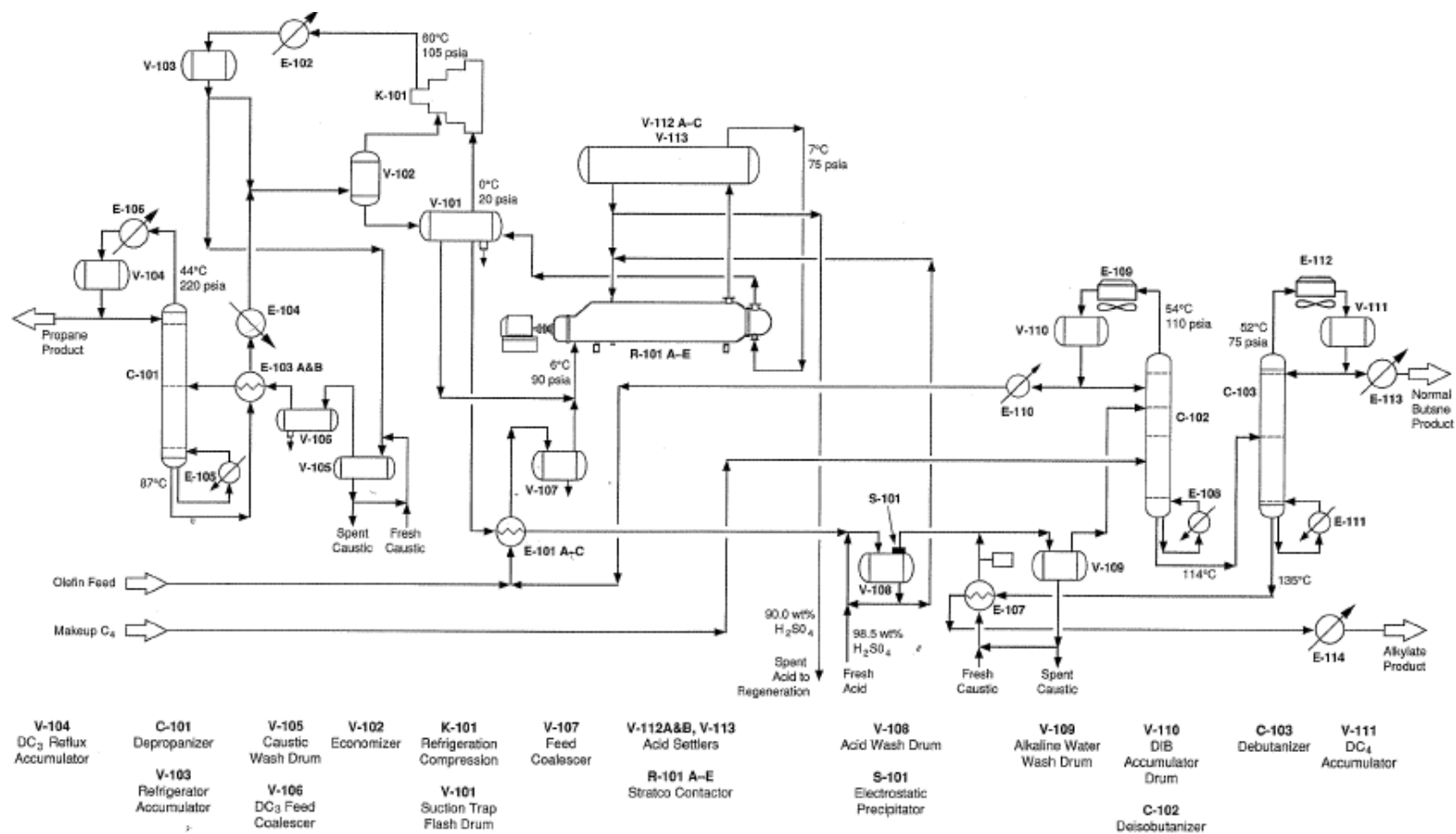
Los gases efluentes del haz de tubos del reactor, que contienen principalmente isobutano y pequeñas cantidades de propano e isoparafinas C₅ – C₇, son

comprimidos y condensados usando agua de enfriamiento. Como la concentración de propano es la más alta en este punto en el sistema, una pequeña corriente de refrigerante es enviada a una depropanizadora para purgar el propano de la unidad de alquilación [11]. El refrigerante remanente y los fondos de la depropanizadora se combinan y se envían a un economizador que opera a una presión intermedia y luego se envían a un flash. El economizador permite ahorrar energía en el compresor. El líquido efluente del flash se regresa a la sección de reacción, en la que provee un 50% del exceso de isobutano requerido para la reacción de alquilación [11]. Ésta corriente contiene principalmente isobutano y alquilato, y también pequeñas cantidades de sulfatos, ácido y ésteres. Existen tres métodos para tratar esta corriente: Lavado con agua ácida/alcalina, lavado con soda/agua y tratamiento con bauxita [11].

Fraccionamiento

Una vez el efluente del reactor es tratado para eliminar los sulfatos y ésteres pasa a una columna deisobutanizadora en la que el isobutano es recuperado en el tope y enfriado antes de ser reciclado a la zona de reacción. Los fondos de la deisobutanizadora son enviados a una columna debutanizadora en la que es recuperado n-butano en el tope y el producto alquilato en los fondos [11]. En la Figura 1A se observa un diagrama de flujo simplificado del proceso.

Figura 1A. Diagrama de flujo simplificado del proceso de alquilación con H₂SO₄ [11].



ANEXO 2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DEL ALQUILACIÓN CON HF

Reacción y recuperación del producto

Las olefinas se secan y luego se combinan con reciclo de isobutano y se cargan a la zona de reacción. El alimento de hidrocarburos se mezcla con HF enfriado y fluye a través del reactor hacia el sedimentador de ácido. Las condiciones de reacción son 32°C y 100 psia [11]. En el sedimentador de ácido, el HF se separa de la fase de hidrocarburos y fluye por gravedad hacia la carcasa de los enfriadores de ácido. La fase de hidrocarburos del sedimentador que consiste de propano, reciclo de isobutano, n-butano y alquilato, es cargada al “isostripper” que es la torre de fraccionamiento principal. El rehervidor del isostripper es un calentador de fuego directo que se usa para obtener una temperatura suficientemente alta en el fondo para que los fluoruros orgánicos se descompongan [11].

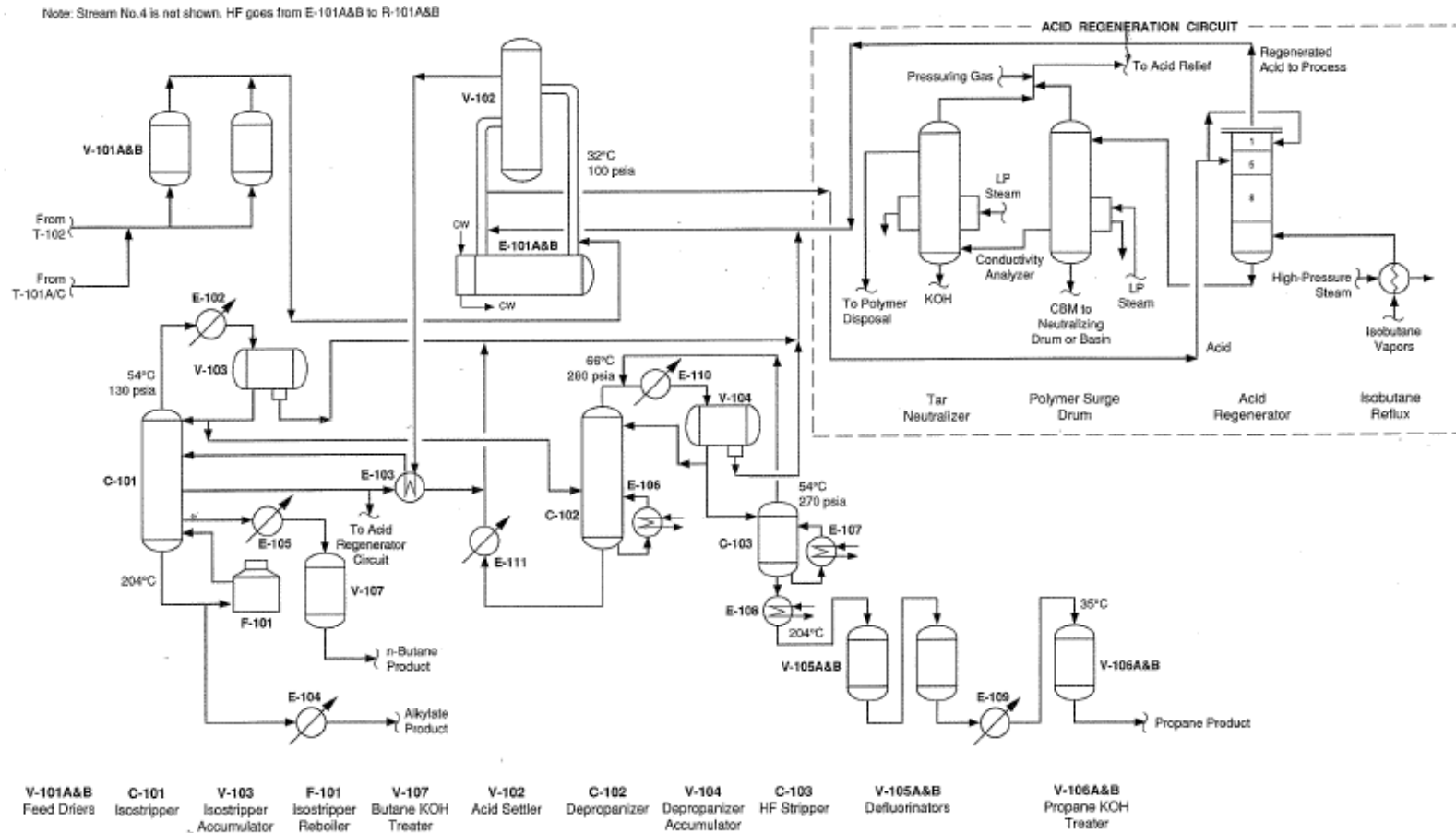
El destilado del isostripper, que contiene propano, isobutano y HF es enviado a la torre depropanizadora. El destilado de la depropanizadora se envía a un despojador de HF, y el destilado de ésta se regresa al isostripper para recuperar ácido e isobutano. El propano de alta pureza recuperado en los fondos se defluoriza catalíticamente con Al_2O_3 y luego pasa a un neutralizador con KOH [11].

El reciclo de isobutano es recuperado por debajo del plato de alimentación del isostripper. Una pequeña porción de la corriente lateral de isobutano se envía al circuito de regeneración de ácido. El balance de la corriente lateral de isobutano se combina con los fondos de la depropanizadora y se reciclan a la zona de reacción [11].

Una corriente lateral rica en n-butano extraída cerca del fondo del isostripper es enfriada primero y luego tratada con KOH antes de mandarla a los tanques de almacenamiento.

El alquilato es recuperado en los fondos del isostripper y es enfriado antes de almacenarlo. Este producto no necesita tratamientos especiales para remover trazas de fluoruros. En la Figura 2A se muestra un diagrama de flujo simplificado del proceso de alquilación con HF.

Figura 2A. Diagrama de flujo simplificado del proceso de alquilación con HF [11].



ANEXO 3. PROPIEDADES FÍSICAS Y TÓXICAS DE CADA ÁCIDO Y LAS CONSECUENCIAS QUE CONLLEVA EL CONTACTO CON ELLOS.

Tabla 1. Propiedades físicas y de toxicidad del Ácido Sulfúrico y el Ácido Fluorhídrico [17,12].

Parámetro	Ácido Sulfúrico	Ácido Fluorhídrico
Toxicidad		
ERPG-1 (ppm)	0.5	2
ERPG-2 (ppm)	2.5	20
ERPG-3 (ppm)	7.5	50
OSHA PEL-TWA (mg/m ³)	1	2.45
Rata de Inhalación LC50 (mg/m ³ /2hr)	510	1276 ppm/1hr
Riesgo de Salud según NFPA	3 (Venenosos)	4 Extremo (Venenosos)
Riesgo de contacto según NFPA	4 - Extremo (Corrosivos)	4 - Extremo (Corrosivos)
Reactividad según NFPA	3 (Severo – reacción exotérmica con agua)	2 - Moderado
Inflamabilidad según NFPA	0	0
T de ebullición (°C)	340	19.7
Densidad (kg/m ³)	1842.9 a 15.6°C	1014.9 a 0°C
Presión de vapor, psia, 25°C	4x10 ⁻⁶	17.6
Viscosidad, 10°C, cP	40	0.23

ERPG: Emergency Response Planning Guidelines. Estos valores proporcionan una estimación de los rangos de concentración para los que es razonable anticipar

los efectos adversos que se producen a causa de la exposición a una determinada sustancia [17].

ERPG-1: Máxima concentración en aire por debajo de la cual se cree que casi todos los individuos pueden estar expuestos hasta 1 hora experimentando sólo efectos adversos ligeros y transitorios o percibiendo un olor claramente definido [17].

ERPG-2: Máxima concentración en aire por debajo de la cual se cree que casi todos los individuos pueden estar expuestos hasta 1 hora sin experimentar o desarrollar efectos serios o irreversibles o síntomas que pudieran impedir la posibilidad de llevar a cabo acciones de protección [17].

ERPG-3: Máxima concentración en aire por debajo de la cual se cree que casi todos los individuos pueden estar expuestos hasta 1 hora sin experimentar o desarrollar efectos que amenacen su vida [17].

PEL-TWA: Permissible Exposure Limit (PEL) - Time Weighted Average (TWA).

Ácido Fluorhídrico (HF)

El ácido fluorhídrico es un gas incoloro bastante corrosivo, o líquido fumante a temperaturas por debajo de 19.5 °C, con un fuerte olor acre que es detectable a menos de 0.1 ppm [24].

La exposición de humanos al HF ocurre principalmente por absorción a través de la piel y/o inhalación. Dependiendo de la concentración, la exposición dérmica aguda puede llevar a destrucción de capas de tejido profundas, y puede causar también hipocalcemia, hipomagnesemia, hipercalcemia y arritmia cardíaca e incluso puede disolver los huesos. La inhalación de vapores de HF puede causar edema pulmonar y en casos severos, la muerte [12, 24].

En los Estados Unidos, el HF ha sido identificado como un contaminante peligroso por la actual ley federal y estatal, el ácido sulfúrico no lo ha sido [12].

Ácido Sulfúrico

El H_2SO_4 es un líquido denso y aceitoso, de color café pardo y corrosivo. En contacto con el ácido sulfúrico rápidamente destruye el tejido del cuerpo y causa severas quemaduras. Su inhalación puede causar daño en la nariz, el tracto respiratorio y los pulmones. Tos, inflamación crónica y bronquitis crónica puede resultar de una sobre exposición [12].

ANEXO 4. PASOS PARA CALCULAR EL ÍNDICE DE SEGURIDAD INHERENTE

1. Subíndice de calor de reacción de las reacciones principales y secundarias (I_{RM} y I_{RS}): El calor liberado por la reacción se calcula según la siguiente ecuación:

$$\Delta H_r = \sum (H_f)_{\text{productos}} - \sum (H_f)_{\text{reactivos}}$$

Si existen varias reacciones principales o secundarias, según el caso, se usa el valor más alto de calor de reacción para asignar el puntaje. La Tabla 1 muestra los puntajes dados a los subíndices de acuerdo a la liberación de calor.

Tabla 1. Determinación de los subíndices de calor de reacción [3].

Calor de reacción/ masa total	Puntaje
Térmicamente neutral ≤ 200 J/g	0
Poco exotérmica < 600 J/g	1
Moderadamente exotérmica < 1200 J/g	2
Fuertemente exotérmica < 3000 J/g	3
Extremadamente exotérmica ≥ 3000 J/g	4

La química de la alquilación es muy complicada puesto que se dan muchas reacciones principales y secundarias, y a la vez, algunas reacciones en cadena, por tanto es difícil asegurar cuantas reacciones se llevan a cabo. Para asignar el puntaje a estos subíndices se tomó la información disponible en el SRI handbook [11] sobre los componentes producidos por la alquilación con HF y con H₂SO₄. Se observó que los trimetilpentanos (TMP) son los compuestos producidos en mayor cantidad y también son los de mayor octanaje. Las reacciones fueron encontradas en la literatura [4, 11], y se asumió que las reacciones principales, son aquellas en las cuales se produce TMP, y las demás reacciones son secundarias.

2. Índice de Interacción Química (I_{INT}): Este subíndice considera las reacciones indeseadas de las sustancias del proceso con materiales en el área de la planta. Estas reacciones no están incluidas en el subíndice de reacciones secundarias porque no se espera que sucedan [3].

Se usó la matriz de la EPA (Environmental Protection Agency) [21], para clasificar los peligros de las interacciones químicas en el proceso. La peor interacción entre las sustancias determina el puntaje del subíndice. En la Tabla 2 se muestran los puntajes asignados a este subíndice.

Tabla 2. Puntajes del Índice de Interacción Química [3].

Interacción Química	Puntaje
Formación de calor	1-3
Fuego	4
Formación de gases no tóxicos, no inflamables	1
Formación de gases tóxicos	2-3
Formación de gases inflamables	2-3
Explosión	4
Polimerización rápida	2-3
Químicos Tóxicos solubles	1

3. Subíndice de inflamabilidad, Explosividad y Toxicidad (I_{FL} , I_{EX} , I_{TOX}): Cada uno de estos subíndices se calcula para cada sustancia presente en el proceso y se suman. La suma máxima determina el puntaje del subíndice. El subíndice de inflamabilidad (I_{FL}) está basado en el punto flash y el punto de ebullición de las sustancias, el subíndice de explosividad (I_{EX}) está basado en los límites de explosividad superior e inferior (LEL y UEL) y el subíndice de toxicidad (I_{TOX}) está basado en el TLV (Threshold Limit Value). Las Tablas 3 – 5 muestran los puntajes de los subíndices.

Tabla 3. Puntajes del subíndice de inflamabilidad [3].

Inflamabilidad	Puntaje
No inflamable	0
Combustible (flash point > 55°C)	1
Inflamable (flash point ≤ 55°C)	2
Fácilmente inflamable (flash point < 21°C)	3
Muy inflamable (flash point < 0°C y punto de ebullición ≤ 35°C)	4

Tabla 4. Puntajes para el subíndice de explosividad [3].

Explosividad (UEL-LEL) vol%	Puntaje
Non explosive	0
0-20	1
20-45	2
45-70	3
70-100	4

Tabla 5. Puntajes para subíndice de toxicidad [3].

Toxic Limit (ppm)	Score
TLV > 1000	0
TLV ≤ 10000	1
TLV ≤ 1000	2
TLV ≤ 100	3
TLV ≤ 10	4
TLV ≤ 1	5
TLV ≤ 0.1	6

Se tuvieron en cuenta todas las sustancias presentes en el proceso, no solo el alimento, sino también sustancias para el tratamiento del producto, tales como los secadores, álcalis (neutralizadores) y defluorinadores, en el caso de la alquilación con HF.

4. Subíndice de Corrosividad (I_{COR}): Este subíndice se determina con base en el material de construcción requerido. La Tabla 6 muestra los puntajes para este subíndice.

Tabla 6. Puntajes para el subíndice de corrosividad [3].

Material de construcción requerido	Puntaje
Acero al carbono	0
Acero inoxidable	1
Necesita un mayor material	2

5. Subíndice de inventario (I_I): El inventario total es la suma de los inventarios de todos los equipos del proceso. La Tabla 7 muestra los puntajes para este subíndice.

Tabla 7. Puntajes para subíndice de inventario [3].

Inventario	Puntaje
0-1 t	0
1-10 t	1
10-50 t	2
50-200 t	3
200-500 t	4
500-1000 t	5

6. Subíndices para la Temperatura y Presión del Proceso (I_P, I_T): Estos dos subíndices son determinados con base en el máximo valor de P y T en el proceso. En las Tablas 8 – 9 se muestran los puntajes para cada subíndice.

Tabla 8. Puntajes para el subíndice de Presión [3].

Presión	Score
0.5-5 bar	0
0-05 or 5-25 bar	1
25-50 bar	2
50-200 bar	3
200-1000 bar	4

Tabla 9. Puntajes para el subíndice de temperatura [3].

Temperatura	Score
< 0°C	1
0-70°C	0
70-150°C	1
150-300°C	2
300-600°C	3
> 600°C	4

7. Subíndice para la seguridad del equipo (I_{EQ}): Involucra el tipo de equipo usado en el proceso y lo clasifica de acuerdo al grado de peligro que representa para el proceso. El subíndice incluye equipos dentro del área de límite de baterías (ISBL), en la cual las materias primas se convierten en productos, y el equipo fuera del área de límite de baterías (OSBL) [3]. Las Tablas 10 – 11 muestran los puntajes para estos subíndices.

Tabla 10. Puntajes para la seguridad del Equipo for ISBL [3].

Tipo de equipo	Puntaje
Equipo que maneja materiales no inflamables y no tóxicos.	0
Intercambiadores de calor, bombas, torres, tanques.	1
Enfriadores con aire, reactores, bombas de alto riesgo	2
Compresores, reactores de alto riesgo.	3
Hornos, calentadores de fuego directo.	4

Tabla 11. Puntajes para la seguridad del equipo OSBL [3].

Tipo de equipo	Puntaje
Equipo que maneja materiales no inflamables y no tóxicos.	0
Tanques de almacenamiento atmosféricos, bombas	1
Torres de enfriamiento, compresores, sistemas de blowdown, tanques de almacenamiento presurizados o refrigerados.	2
Teas, calderas, hornos	3

8. Subíndice de Estructura segura del Proceso (I_{ST}): Se determina basado en reportes de accidentes, estándares y recomendaciones encontradas en bases de datos. La Tabla 12 muestra los puntajes para este subíndice.

Table 12. Puntajes para la estructura segura del proceso [3].

Nivel de seguridad de la estructura del proceso	Puntaje
Recomendado	0
Reconocida práctica de ingeniería	1
No hay datos o es neutral	2
Probablemente no segura	3
Se encuentran incidentes menores	4
Se encuentran accidentes mayores	5

ANEXO 5. SISTEMA DE PUNTAJE DE RIESGOS

Para desarrollar el puntaje de riesgos, el autor se basa en la típica definición de riesgo:

$$Riesgo = Frecuencia \times Consecuencia \quad \text{Ec. (1)}$$

Asumiendo que las probabilidades de falla de las salvaguardas son independientes:

Ec. (2):

$$Frecuencia = Frecuencia \text{ de la causa} \times \prod_{i=1}^{\text{Número de salvaguardas}} P(\text{falla de la salvaguarda } i)$$

Reemplazando la Ecuación (2) en (1) se obtiene la siguiente ecuación: (3)

Ec. (3):

$$Riesgo = \left[Frecuencia \text{ de la causa} \times \prod_{i=1}^{\text{Número de salvaguardas}} P(\text{falla de la salvag. } i) \right] \times Consecuencia$$

Dado que los puntajes de riesgo representan medidas de orden de magnitud, la ecuación (3) puede ser modificada reconociendo que la multiplicación se puede hacer mediante la adición de los exponentes de base diez [7]. El resultante de la ecuación es:

$$Puntaje \text{ de Riesgo} = Puntaje \text{ de causa} - \sum_{i=1}^{\text{Número de salvaguardas}} (Puntaje \text{ de la salvaguarda } i) + Puntaje \text{ de consecuencia}$$

Si hay varios escenarios, el riesgo total de la planta está dado por:

$$Riesgo\ total = Log_{10} \left[\sum_{i=1}^{Número\ de\ eventos} 10^{Puntaje\ del\ evento} \right]$$

Los puntajes se asignan a las causas, consecuencias y salvaguardas según las Tablas 1 – 3.

Tabla 1. Puntaje para la frecuencia de las causas [7].

Puntaje	Orden de magnitud de la frecuencia	Descripción cualitativa
1	Aprox. una vez al mes	Se espera que ocurra frecuentemente.
0	Una vez al año	Probable que ocurra ocasionalmente, varias veces en el tiempo de vida de la planta.
-1	10% posibilidad de una vez al año	Probable que ocurra más de una vez en el tiempo de vida de la planta.
-2	1% posibilidad de una vez al año	Probablemente no ocurra más de una vez en el tiempo de vida de la planta
-3	0.1% posibilidad de una vez al año	No se espera, pero podría ocurrir durante el tiempo de vida de la planta.
-4	0.1% posibilidad de una vez al año	Sería sorprendente si ocurriera en el tiempo de vida de la planta.
-5	0.01% posibilidad de una vez al año	Extremadamente remoto. No se espera que sea posible.

Tabla 2. Puntaje para las salvaguardas [7].

Puntaje	Prob.de que la salvaguarda falle cuando se necesite	Prob. de éxito de la salvaguarda cuando se necesite	Ejemplo
0	1	0	No hay salvaguarda o muy poco confiable
1	0.1	0.9	Un solo operador respondiendo a una alarma con tiempo adecuado
2	0.01	0.99	Set de sensores, controladores o artefacto de respuesta chequeado regularmente.
3	0.001	0.999	Salvaguarda pasivo (válvula de alivio, diques)
4	0.0001	0.9999	Salvaguardas con elementos redundantes para lograr alta confiabilidad

Tabla 3. Puntaje para las consecuencias [7].

Punt.	Descripción Cualitativa	Poco Probable pero posible, efecto sobre 1 o 2 personas (aprox. 10% probabilidad)	Efectos razonablemente esperados que ocurran a 1 o 2 empleados en el sitio	Efectos razonablemente esperados que le ocurran a más de 2 personas en el sitio o a alguien por fuera	Impacto a las instalaciones, ambiente, compañía.
6	Extremadamente alto	→	→	Fatalidad(es)	
5	Muy alto	→	Fatalidad(es)	Incapacidad inmediata, efectos de salud permanentes	Resulta en grandes daños ambientales. Completa pérdida de las instalaciones. Largo tiempo fuera de servicio.
4	Alto	Fatalidad(es)	Incapacidad inmediata, efectos de salud permanentes	Heridas severas que requieren hospitalización. Pérdida de tiempo significativa.	Resulta en serios daños ambientales, daño significativo de la planta y/o tiempo fuera de servicio extendido.
3	Intermedio	Incapacidad inmediata, efectos de salud permanentes	Heridas severas que requieren hospitalización. Pérdida de tiempo significativa.	Heridas que requieren tratamiento médico.	Resulta en daño ambiental significativo, daños menores a la planta y poco tiempo fuera de servicio.
2	Bajo	Heridas severas que requieren hospitalización. Pérdida de tiempo significativa.	Heridas que requieren tratamiento médico.	Heridas menores. Casos de primeros auxilios.	Poco probable que impacte el ambiente o que la planta reciba daños.
1	Muy Bajo	Heridas que requieren tratamiento médico.	Heridas menores. Casos de primeros auxilios.	Probablemente ninguno	Probablemente ninguno
0	Despreciable	Heridas menores. Casos de primeros auxilios.	Probablemente ninguno	Probablemente ninguno	Probablemente ninguno

ANEXO 6. METODOLOGÍA PARA CALCULAR EL ÍNDICE DE EXPOSICIÓN A QUÍMICOS DE DOW

